



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO
ESTRUCTURAL DE CONCRETO LIGERO**

T E S I S

QUE PARA OPTAR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS

P R E S E N T A :

SERGIO VALDÉS CONSTANTINO



TUTOR:
CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO

2010

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Óscar López Bátiz
Secretario: M. I. Raúl Jean Perrilliat
Vocal: M. I. Carlos Javier Mendoza Escobedo
1er. Suplente: M. I. Octavio García Domínguez
2do. Suplente: Dr. Rodolfo Ernesto Valles Mattox

Lugar donde se realizó la tesis:

Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. Av.
Insurgentes Sur 300, Delegación Coyoacán, México Distrito Federal.

Laboratorio de Ingeniería Experimental y de Control. Prol. Morelos 14,
Tulyehualco, Delegación Xochimilco, México Distrito Federal.

TUTOR DE TESIS:

M. I. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO

FIRMA

AGRADECIMIENTOS:

A mi Universidad,

Por luchar para seguir siendo pública y darnos la oportunidad
a muchas personas de obtener nuestros estudios
con una calidad reconocida.

A mi Facultad,

Por estar a la vanguardia en cuanto a conocimientos
y compartirlos.

A mi tutor,

Por el esfuerzo, paciencia y perseverancia necesaria para
concluir este trabajo.

A mi Padre,

Por toda la ayuda que me brindó y por ser un magnífico
ejemplo de una gran persona.

A mi Madre y a Rafa,

Por todo el aliento en momentos cruciales
a lo largo de mi vida.

A mi Abuelita Martha,

Por el cobijo que he recibido de su parte, por los consejos
tan atinados y por su amor.

A Ehecatl,

Por ser el motor que me da la fuerza para hacer todo lo que hago.

RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE CONCRETO LIGERO

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN

- 1.1. Problemática
- 1.2. Importancia de abordar el problema
- 1.3. Objetivo del trabajo

2. ANTECEDENTES CONCEPTUALES

- 2.1. Concreto Ligero Aislante y de Resistencia Moderada
- 2.2. Concreto Ligero Estructural

3. MÉTODO DE PROPORCIONAMIENTO DE CONCRETOS LIGEROS

- 3.1. Factores que Intervienen en el Proporcionamiento del Concreto Ligero
- 3.2. Primera Estimación de las Proporciones de la Mezcla
- 3.3. Ajuste en las Proporciones de la Mezcla

4. CARACTERIZACIÓN DEL CONCRETO LIGERO

- 4.1. Diseño de Mezclas
- 4.2. Tipos de Concreto Ligero
- 4.3. Resistencia a Compresión
- 4.4. Resistencia a Tensión
- 4.5. Módulo de Elasticidad y Relación de Poisson

5. EJEMPLO DE APLICACIÓN A UN EDIFICIO

- 5.1. Geometría de la Estructura
- 5.2. Calidad de los Materiales
- 5.3. Cargas Consideradas
- 5.4. Combinaciones de Carga
- 5.5. Análisis Estructural

- 5.6. Diseño de Elementos
- 5.7. Cuantificación
- 5.8. Costos de Producción

6. RECOMENDACIONES EMITIDAS EN LOS CÓDIGOS

- 6.1. Recomendaciones Emitidas por el ACI
- 6.2. Recomendaciones Emitidas por el Reglamento de Nueva Zelanda

7. CONCLUSIONES

ANEXOS

- A. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS
- B. GRÁFICAS DE MÓDULO DE ELASTICIDAD
- C. DISEÑO ESTRUCTURAL DE ELEMENTOS DE CONCRETO
- D. CUANTIFICACIÓN DE EDIFICIOS

1. INTRODUCCIÓN

A pesar de que el concreto ligero ha tenido un uso ancestral, en la actualidad y durante gran parte de su historia únicamente fue y es utilizado bajo situaciones particulares, de tal manera que a la fecha no ha sido empleado como técnica recurrente en la industria de la construcción. Este trabajo pretende la aportación de elementos para propiciar su uso con fines estructurales; importantes pueden ser las ventajas de su empleo: destacan la reducción de los miembros de cimentación, es decir menor geometría y número de piezas coladas, debido a cargas muertas más bajas. En construcciones de concreto, el peso propio es un porcentaje importante de la carga total de la estructura, también y considerando que la carga muerta reducida significará fuerzas sísmicas menores, da por resultado elementos más fáciles de maniobrar y colocar, lo que conlleva menor costo de envío y producción en estructuras prefabricadas.

Las características desfavorables, desde el punto de vista constructivo de ciertos tipos de suelos y particularmente los ubicados en la mayor parte del Valle de México hacen quizá imprescindible el buscar alternativas innovadoras para el diseño de estructuras.

La innovación en ingeniería suele inducir resistencias a los cambios, las propuestas provocan siempre inercias, más sin embargo este trabajo pretende proporcionar elementos de diseño que complementen la información hasta ahora existente en códigos y reglamentos, y además, sobre todo, que estimulen la implementación de concretos ligeros en el cálculo estructural.

En este apartado se presentan las razones que motivaron el estudio del concreto ligero como material de uso estructural así como el objetivo que se pretende alcanzar. En el capítulo 2, se describen los conceptos de concreto ligero y algunas de sus clasificaciones; el método de diseño de proporcionamiento para este tipo de concreto es descrito en el capítulo 3, mientras que en el capítulo 4 se realiza la caracterización de los concretos empleados, en los que difiere la masa volumétrica para establecer los rangos de estudio. Cabe mencionar que las pruebas realizadas fueron resistencia a compresión, resistencia a tensión, módulo de elasticidad y relación de Poisson. En el capítulo 5 se muestra el cálculo de un edificio con concreto de peso normal comparado con uno de concreto ligero. El capítulo 6 proporciona recomendaciones para el diseño de elementos estructurales con este tipo de concreto emitidas por los códigos del American Concrete Institute y del Reglamento de Nueva Zelanda. Por último, se presentan las conclusiones de este trabajo.

1.1. PROBLEMÁTICA

Siempre ha existido la necesidad de los seres humanos por la evolución de las cosas y se han buscado, a través del tiempo, mejoras que han permitido ahorrar esfuerzos. La base actual de la economía mundial demanda cambios enfocados a la optimización de los recursos existentes.

Los materiales empleados en la construcción han sufrido modificaciones para mejorar el desempeño de las estructuras y su comportamiento ante los cambios climáticos que cada vez se hacen más notorios. Es el caso del concreto, que a pesar de que se había dicho que con la llegada del acero su empleo iba a hacer cada vez menor, la realidad es que sigue siendo la opción más recurrente en edificaciones de pequeña y mediana altura.

Los trabajos que se han hecho para mejorar las propiedades mecánicas del concreto se han enfocado, principalmente, en obtener mezclas con resistencias elevadas y así poder diseñar una estructura con elementos de dimensiones menores que cumplan con las especificaciones mínimas de seguridad establecidas en los códigos. Esto implica una reducción importante en el peso. Otra forma de llegar a esta reducción es buscar materiales con un peso menor que se puedan usar estructuralmente, concretos ligeros.

1.2. IMPORTANCIA DE ABORDAR EL PROBLEMA

En la actualidad, los códigos no abordan de manera suficiente el diseño de elementos de concreto estructural ligero. Por ello, es importante tener información acerca de su comportamiento y poder establecer recomendaciones a partir de los resultados obtenidos en el laboratorio que sirvan de base para futuras actualizaciones en los códigos.

1.3. OBJETIVO

Proporcionar y aplicar recomendaciones de diseño basadas en pruebas de laboratorio que traten de complementar los vacíos de información que existen en los códigos.

2. ANTECEDENTES CONCEPTUALES

El concreto ligero tiene un uso ancestral, de ello se tienen ejemplos en el Puerto de Cosa en el Mediterráneo, el Coliseo en Roma, entre otros. Ha tenido una utilidad especial en el desarrollo de construcciones portuarias, ya que aprovechan su masa volumétrica en estructuras de flotación. Una reducción del 25% en masa en concreto reforzado del concreto normal puede dar lugar a una reducción del 50% en carga cuando está sumergida; además de su resistencia a los ataques químicos producidos por sales, ayudándose para ello del empleo de cementos puzolánicos en la elaboración de este tipo de concreto.

En cuanto al costo, a pesar de que generalmente el metro cúbico de este tipo de concreto es mayor al del concreto de masa normal, se puede reducir el costo total por:

- La reducción de los miembros de apoyo (menor geometría y menor número de piezas coladas), debido a cargas muertas más bajas. En construcciones de concreto, el peso propio es un porcentaje importante de la carga total de la estructura.
- La carga muerta reducida significará menores fuerzas sísmicas, elementos más fáciles de maniobrar y colocar, menor costo de envío y producción.

- El recubrimiento en elementos estructurales podría ser reducido debido a la mayor resistencia al fuego.

Una ventaja en el aspecto arquitectónico se aplica a los pisos volados, a edificios más altos o a pisos adicionales agregados a las estructuras existentes.

El uso del concreto ligero puede también ser necesario cuando se requieran mejores aisladores térmicos o acústicos, como el aislamiento de agua caliente o del medio ambiente.

A continuación, se mencionan algunas características que se han encontrado en investigaciones sobre concretos ligeros. Un criterio de clasificación muy frecuente en los concretos ligeros, toma en consideración los materiales que lo integran y los procedimientos de fabricación. La siguiente tabla resume este criterio de clasificación:

TABLA 2.1 CLASIFICACIÓN CONSIDERANDO LOS MATERIALES QUE LO INTEGRAN

Tipo de concreto	Descripción
<i>Concreto sin finos.</i>	Concretos en que la ligereza se obtiene suprimiendo el agregado fino, con lo que se producen numerosos vacíos entre las partículas de agregado grueso
<i>Concretos aireados, celulares, espumosos o gaseosos.</i>	Concretos ligeros producidos por la formación de burbujas gaseosas dentro de la masa fluida de una lechada o un mortero
<i>Concretos de agregados ligeros.</i>	Concretos ligeros obtenidos de mezclas convencionales en los que se utilizan agregados naturales o artificiales de muy bajo peso específico

Otro criterio de clasificación, más común, relaciona las propiedades y pesos volumétricos de la mezclas. La tabla 2.2 describe dicha clasificación.

TABLA 2.2 CLASIFICACIÓN CONSIDERANDO PROPIEDADES Y MASAS VOLUMÉTRICAS DE LAS MEZCLAS

Tipo de concreto	Rango de pesos volumétricos
<i>Concretos ligeros de baja resistencia y características excepcionalmente buenas de aislamiento térmico.</i>	250 a 800 kg/m ³
<i>Concretos ligeros de resistencia media y adecuadas características de aislamiento térmico.</i>	800 a 1400 kg/m ³
<i>Concretos ligeros de resistencia estructural y limitadas características de aislamiento térmico</i>	1400 a 2100 kg/m ³

2.1. CONCRETO LIGERO AISLANTE Y DE RESISTENCIA MODERADA

El concreto ligero aislante tiene una masa volumétrica de no más de 800 kg/m^3 . Es producido con cemento, agua, aire, con o sin agregados y aditivos químicos. La resistencia a compresión a los 28 días es de 7 a 70 kg/cm^2 . Su uso es principalmente el aislamiento térmico y acústico, cubiertas, relleno para sub-bases de losas de cimentación, capa de nivelación de piso o cubierta, muros a prueba de fuego y revestimientos de conductos térmicos subterráneos.

El concreto ligero de resistencia moderada tiene una masa volumétrica seca en el horno de 800 a 1900 kg/m^3 y una resistencia a compresión de aproximadamente 70 a 180 kg/cm^2 . Es producido con cemento, agua, aire, con o sin agregados y aditivos químicos. Los concretos de más baja masa volumétrica se usan como relleno para aislamiento térmico y acústico de pisos, muros y cubiertas, mientras que los de mayor masa volumétrica se usan para muros colados en obra, pisos, cubiertas y paneles prefabricados para muros y pisos.

Para fines de exposición los concretos ligeros aislantes y de moderada resistencia se pueden clasificar de la siguiente manera:

TABLA 2.1 CLASIFICACIÓN DE CONCRETOS AISLANTES Y DE MODERADA RESISTENCIA

Grupo	Descripción	Masa volumétrica (kg/m^3)	Aplicaciones
I	Se produce con agregados expandidos, tales como perlitas, vermiculitas, o con poliestireno.	240 – 800	Concreto aislante y algunos concretos de moderada resistencia se pueden producir con estos agregados
II	Se produce con agregados fabricados con materiales expandidos, calcinados o sinterizados, tales como escoria de alto horno, arcilla, diatomita, ceniza volante, esquisto o pizarra, o por el procesamiento de materiales naturales como la piedra pómez, escoria o tufa.	720 – 1440	Concretos ligeros de moderada resistencia y algunos de estos materiales se emplean en los concretos estructurales ligeros
III	Representa los concretos que se producen con la incorporación, en la pasta de cemento o en el mortero de cemento y arena, de una estructura celular uniforme de vacíos de aire que es obtenida con espuma preformada.	240 – 1900	Se pueden producir concretos celulares que atiendan los requisitos de los concretos aislantes y de moderada resistencia

2.1.1. Proporciones de la mezcla

Los requisitos de agua para los concretos aislantes y de relleno varían considerablemente dependiendo de las características de los agregados. Se debe evitar una cantidad excesiva de agua en los concretos aislantes ya que esto aumenta la contracción por secado y el agrietamiento pudiendo dañar las membranas de impermeabilización.

Las proporciones de mezcla del grupo II se basan normalmente en volúmenes de materiales secos y sueltos, aún cuando los agregados estén húmedos al dosificarse. Las proporciones satisfactorias pueden variar considerablemente para diferentes agregados o combinaciones de ellos.

2.1.2. Trabajabilidad

Debido a su alto contenido de aire, los concretos ligeros que tienen masa volumétrica menor a 800 kg/m³ tienen una excelente trabajabilidad. En los concretos celulares revenimientos hasta de 250 mm normalmente son satisfactorios para los concretos de los grupos I y III. Los concretos celulares se manejan como líquidos.

2.1.3. Mezclado y colocación

Se debe mezclar mecánicamente todo el concreto para producir una distribución uniforme de los materiales, con una consistencia adecuada y la masa volumétrica requerida. En la dosificación de los materiales se pueden seguir diversas secuencias. La secuencia preferiblemente comienza con la introducción del agua requerida en la mezcladora y una posterior adición de cemento, agente inclusor de aire o formador de espuma, agregado, espuma preformada y otros ingredientes.

Se debe evitar el mezclado y manejo excesivo de la mezcla, debido a que se pueden romper las partículas del agregado y esto cambiará la masa volumétrica de la mezcla y su consistencia. Normalmente la segregación no es un problema debido a la elevada cantidad de aire en estas mezclas.

Para colocar este tipo de concreto normalmente se emplea el bombeo, aunque los otros métodos para colocación de concreto de masa normal también pueden ser aplicados.

2.1.4. Resistividad térmica

El concreto con agregados ligeros tiene comúnmente una expansión térmica menor que el concreto de masa normal. Esto puede ocasionar algunos problemas cuando se usa en una misma construcción los dos tipos de concreto, ya que la deformación debida al incremento de la temperatura es diferente. La resistividad térmica que tiene el concreto ligero lo hace un material adecuado para estar sujeto a diferentes temperaturas. El acero de refuerzo también se ve protegido ante un incremento de temperatura.

Le resistencia al fuego del concreto ligero es mayor que la del concreto de masa normal debido a su mayor resistividad térmica.

La figura 2.1 muestra una relación aproximada entre la resistividad térmica y la masa volumétrica. La conductividad térmica aumenta con el incremento de humedad y de masa volumétrica:

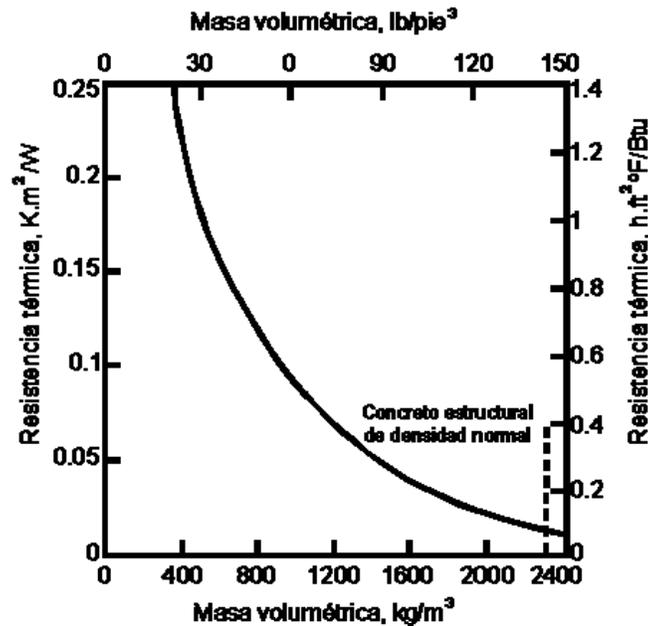


FIGURA 2.1 RESISTENCIA TÉRMICA CONTRA MASA VOLUMÉTRICA DEL CONCRETO

2.1.5. Resistencia a congelación y deshielo

Existe poca investigación al respecto, debido a que los concretos aislantes y de moderada resistencia usualmente no necesitan soportar la condición de congelación y deshielo. Normalmente están protegidos contra la intemperie.

2.1.6. Aislamiento acústico

La buena absorción del sonido es una característica del concreto ligero. El sonido lo disipa por medio de calor. El coeficiente de absorción es aproximadamente del doble del correspondiente al concreto de masa normal, sin embargo, la superficie que se genera tiene una reflexión del sonido importante.

2.1.7. Contracción por secado

En el concreto aislante y de moderada resistencia, cuando se emplean como aislamiento o relleno, la contracción por secado no es importante en la mayoría de los casos, sin embargo, una deformación

excesiva puede causar alabeo. En el caso de uso estructural, esta contracción se debe tomar en cuenta. Con respecto al concreto de masa normal, la contracción por secado del concreto ligero aumenta entre el 5% y 40%, aunque para algunos agregados la contracción pudiera ser mayor.

Entre los concretos ligeros, los concretos celulares producidos sin agregados y sometidos a un curado húmedo presentan una mayor contracción por secado.

En la siguiente tabla se muestran los rangos de contracción por secado para algunos concretos:

TABLA 2.2 CONTRACCIÓN POR SECADO DE ALGUNOS CONCRETOS LIGEROS

Tipo de concreto	Contracción por secado
Concreto celular sometido a un curado húmedo, producidos con arena	0,10% a 0,60%
Concreto aislante producido con agregado de perlita y piedra pómez	0,10% a 0,30%
Concreto con vermiculita	0,20% a 0,45%
Concreto aislante producido con escoria expandida o esquisto expandido	0,06% a 0,10%

2.1.8. Juntas de expansión

En los parapetos, salientes de azoteas y cuando se emplea concreto aislante para losas de cubierta, frecuentemente se especifica una junta de expansión de 25 mm. El propósito de esta junta es absorber la expansión causada por los gradientes de temperatura. Las juntas de expansión transversales se deben colocar con espaciamiento máximo de 3 m en cualquier dirección, para cubrir una expansión de 1 mm por metro. Normalmente para estas juntas se emplea un material de fibra de vidrio o poliuretano.

2.2. CONCRETO LIGERO ESTRUCTURAL

El concreto estructural convencional tiene una masa volumétrica que oscila entre los 2200 y 2400 kg/m³. El concreto estructural ligero es similar en cuanto a propiedades mecánicas al concreto de masa normal, se pueden obtener valores de resistencia y un comportamiento muy semejante, solo que tiene una masa volumétrica menor, que oscila entre 1300 y 1900 kg/m³. Es producido con agregados gruesos y finos ligeros o solamente con agregados gruesos ligeros.

2.2.1. Agregados ligeros

Los agregados ligeros estructurales se clasifican normalmente de acuerdo con su proceso de producción, ya que condiciona sus propiedades, en:

- Arcillas, pizarras y esquistos expandidos en hornos rotatorios
- Esquistos y pizarras expandidas
- Ceniza volante extruida
- Escorias expandidas
- Piedras naturales (pómez y tezontle)

Los agregados que se usan en el concreto de masa normal tienen una masa unitaria que oscila entre 1200 y 1760 kg/m³, mientras que en los agregados ligeros estructurales este rango oscila entre 560 y 1120 kg/m³. Estos agregados pueden absorber de 5% a 20% de agua por peso de material seco, por tanto, para controlar la uniformidad de las mezclas, se sugiere mojar los agregados sin saturarlos antes de la dosificación.

2.2.2. Resistencia a compresión

La resistencia a compresión de los concretos ligeros generalmente se relaciona con el contenido de cemento para un revenimiento deseado y su contenido de aire, mucho más que con la relación agua-cemento. Esto se debe a la dificultad para poder estimar la cantidad de agua que realmente reaccionará con el cemento por la absorción de los agregados. La resistencia a compresión típica varía de 210 a 350 kg/cm². También es posible lograr concretos de alta resistencia con agregados ligeros.

En mezclas bien proporcionadas, la relación entre la resistencia a compresión y el contenido de cemento es razonablemente constante para una determinada fuente de agregados. Sin embargo, la relación variará de una fuente a otra, o de un tipo de agregado a otro. Cuando no se tiene información por parte del proveedor, se requieren elaborar mezclas con cantidades de cemento variables, con el fin de desarrollar un intervalo de resistencias alrededor de la deseada.

2.2.3. Resistencia a tensión

La relación entre la resistencia a tensión y compresión es muy similar a la del concreto de masa normal, aunque se ha visto que las grietas por tensión diagonal en vigas aparecen primero en el concreto ligero.

2.2.4. Módulo de elasticidad y relación de Poisson

La estructura de la curva esfuerzo-deformación del concreto ligero es similar a la del concreto de masa normal. Se ha sugerido en la literatura que la deformación a la falla del concreto ligero es mayor aunque no se ha comprobado debidamente.

Los valores de la relación de Poisson son similares a los del concreto de masa normal, mientras que el módulo de elasticidad varía normalmente entre el 50% y el 75% del valor que se obtiene del concreto ordinario para la misma resistencia, esto implica que en la curva esfuerzo-deformación del concreto ligero la deformación unitaria asociada a la resistencia máxima sea mayor.

2.2.5. Aire incluido

Como en el concreto de masa normal, el aire incluido garantiza resistencia a congelación-deshielo y a las sales descongelantes. También mejora la manejabilidad, reduce el sangrado, la segregación y además puede compensar pequeñas deficiencias en la granulometría del agregado.

Los contenidos de aire generalmente se ubican entre 4% y 9%, dependiendo del tamaño máximo de agregado y las condiciones de exposición. La durabilidad también se mejora considerablemente si se permite que el concreto ligero se seque antes de su exposición a la congelación-deshielo.

2.2.6. Mezclado

En general, los procedimientos de mezclado del concreto ligero son similares a los del concreto de masa normal. Sin embargo, algunos agregados muy absorbentes pueden requerir que se les humedezca antes de su empleo. El agua añadida en la planta de producción debe ser suficiente para producir el revenimiento especificado en obra. El revenimiento en la planta va a ser normalmente mucho mayor que el revenimiento en obra. El bombeo puede agravar aún más la pérdida de revenimiento.

2.2.7. Trabajabilidad y Facilidad de Acabado

Se pueden proporcionar las mezclas de concreto ligero para que tengan la misma trabajabilidad, facilidad de acabado y apariencia similar a los concretos de masa normal. Debe tener suficiente cantidad de pasta de cemento para revestir cada partícula y el agregado grueso no se debe separar del mortero. Es necesario tener suficiente cantidad de agregado fino para mantener la mezcla cohesiva. Si el agregado tiene una deficiencia de partículas de tamaño menor que 600 μm , se puede aumentar la capacidad de acabado a través del uso de una parte de arena natural, o recurrir al aumento en la cantidad de cemento o el uso de otros materiales minerales finos.

2.2.8. Revenimiento

Para lograr la misma trabajabilidad, el concreto ligero necesita tener menor revenimiento que un concreto de masa normal, esto se debe a la masa unitaria del agregado ligero. Por ejemplo, una mezcla de concreto ligero de revenimiento de 50 a 75 mm con aire incluido se puede colocar bajo condiciones que requeriría un concreto de masa normal de 75 a 125 mm de revenimiento. Con mayor revenimiento, las partículas grandes de agregado tienden a flotar hacia la superficie, dificultando el acabado.

2.2.9. Vibración

Se recomiendan las mismas frecuencias usadas en el concreto de masa normal. El tiempo para la consolidación adecuada varía, dependiendo de las características de la mezcla. La vibración excesiva causa segregación. También, es adecuado encontrar los medios para colocar el concreto con cargas estáticas.

2.2.10. Colocación, acabado y curado

Los mejores resultados de acabado se obtienen con concretos ligeros de revenimiento de 50 a 100 mm, revenimiento mayores pueden producir segregación y retraso en las operaciones de acabado y resultar en una superficie áspera e irregular.

Cuando se coloca el concreto con bomba, es necesario realizar pruebas en el lugar con el equipo que se va a emplear, ya que la presión de bombeo hace que el agregado absorba mayor cantidad de agua, disminuyendo el revenimiento y aumentando la masa volumétrica.

Es preferible utilizar herramientas de magnesio para aplanar y alisar la superficie. Las operaciones deben comenzar más rápido que en el caso de concreto de masa normal.

El curado del concreto ligero se realiza de forma similar al de masa normal. Los dos métodos comúnmente usados son el curado con agua y la prevención de la pérdida de humedad de las superficies expuestas mediante la aplicación de películas de retención.

2.2.11. Durabilidad

El concreto ligero es más permeable que el concreto de masa normal, por tal motivo, la exposición ante agentes químicos agresivos que pudieran afectar al acero de refuerzo no se recomendaría. Ante cualquier otro tipo de exposición el concreto ligero se comporta de manera similar al concreto de masa normal.

A manera de resumen se presenta la tabla 2.3 con una comparación de propiedades entre el concreto ligero y el concreto de masa normal.

TABLA 2.3 COMPARACIÓN DE PROPIEDADES ENTRE EL CONCRETO LIGERO Y EL CONCRETO DE MASA NORMAL

Propiedad	Concreto Ligero	Concreto de masa normal
Proporciones de la mezcla (relación agua-cemento)	Menor	Mayor

TABLA 2.3 COMPARACIÓN DE PROPIEDADES ENTRE EL CONCRETO LIGERO Y EL CONCRETO DE MASA NORMAL

Propiedad	Concreto Ligero	Concreto de masa normal
Proporciones de la mezcla (agregado grueso)	Menor	Mayor
Proporciones de la mezcla (agregado fino)	Normalmente menor	Normalmente mayor
Trabajabilidad	Mayor	Menor
Mezclado y colocación	Se efectúa más fácilmente	Se efectúa con mayor dificultad
Resistividad térmica	0,050 a 0,120 K.m ² /W	0,010 a 0,015 K.m ² /W
Aislamiento acústico	Mayor	Menor
Contracción por secado	0,06% a 0,60%	0,01% a 0,02%
Resistencia a compresión	Igual	Igual
Relación entre resistencia a tensión y resistencia a compresión	0,10 a 0,15	0,08 a 0,12
Módulo de elasticidad	50% a 70%	100%

BIBLIOGRAFÍA:

- **American Concrete Institute (2003).** “ACI 213R-03. Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete”.
- **Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese, Jussara Tamesi (2004).** “Diseño y Control de Mezclas de Concreto” EB201 Portland Cement Association.
- **Manuel Mena Ferrer (1967).** “Estudio de Concretos Ligeros” Instituto de Ingeniería.
- **Gyula Rudnai (1963).** “Lightweight Concretes”. Publishing House of the Hungarian Academy of Sciences, Budapest.
- **Short & W. Kinniburgh (1963).** “Lightweight Concrete”. John Wiley and Sons, Inc., Nueva York.
- **A. M. Neville (1975).** “Properties of Concrete” Pitman Publishing

3. MÉTODO DE PROPORCIONAMIENTO DE CONCRETOS LIGEROS

3.1. FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL PROPORCIONAMIENTO DEL CONCRETO LIGERO

3.1.1. Absorción y contenido de humedad de los agregados ligeros

Este tipo de agregados, en comparación con los agregados empleados en el concreto de masa normal, tienen mayor absorción. Es preferible usar agregados ligeros húmedos debido a que tienden a absorber menos agua, esto ocasiona que no haya pérdida de revenimiento y por lo tanto no disminuya su trabajabilidad.

Cuando el contenido de humedad de los agregados es mucho menor que la absorción, es conveniente mezclar primero los agregados con cierta cantidad (de la mitad a dos tercios) del agua empleada antes de agregar la cantidad de cemento, aditivos y el aire incorporado. Esto se realiza para evitar que haya una disminución en el revenimiento.

Los concretos son más vulnerables al congelamiento y descongelamiento cuando se utilizan agregados saturados si no se permite que se liberen del exceso de agua antes de su exposición.

La figura 3.1 muestra las cuatro etapas en las que se pueden encontrar las partículas de los agregados: seca al horno, superficialmente seca, superficialmente húmeda y saturada.

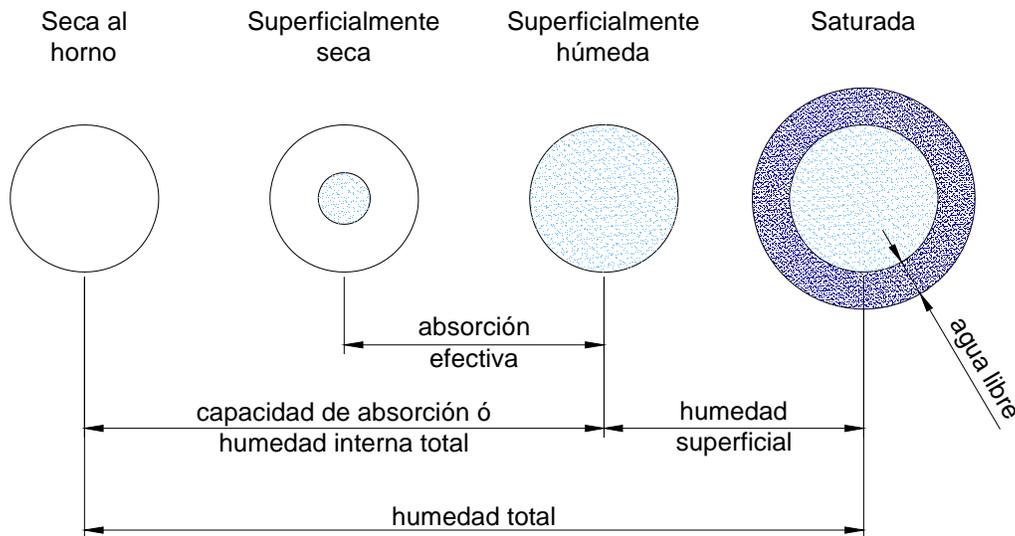


FIGURA 3.1 ETAPAS DE HUMEDAD EN UNA PARTÍCULA DE AGREGADO

Los valores de absorción y contenido de humedad deben ser tomados al momento que se realizará la mezcla para hacer los ajustes necesarios.

3.1.2. Graduación de los agregados ligeros

Un agregado fino o grueso bien graduado implica que la mezcla tendrá un mejor acomodo entre las partículas lo que lleva a una cantidad mínima de vacíos. Esto hace que la cantidad requerida de pasta cementante sea menor al haber menos huecos que llenar y por ende el costo se reduce.

Los agregados ligeros generalmente son angulares y tienen superficie rugosa lo que produce mezclas poco manejables.

En general, un mayor volumen de agregados en la mezcla se logra si:

- El agregado es bien graduado
- La partícula tiene forma ya sea redonda o cúbica
- La superficie de la partícula es menos porosa

Estos factores también influyen en la cantidad de agregado fino a emplear. Es común el empleo de arena de masa normal bien graduada para sustituir al agregado fino ligero. Dicha incorporación aumentará el volumen de agregado grueso a emplear además de mejorar la manejabilidad de la mezcla. En algunos casos se puede incrementar la resistencia y módulo de elasticidad al incorporar

arena de masa normal y reduciendo el tamaño máximo de agregado, al contrario de lo que sucede en el concreto de masa normal.

En el concreto de masa normal, los porcentajes retenidos en la mallas en masa y en volumen son muy semejantes debido a que la densidad específica de los materiales que son retenidos en cada malla no difiere considerablemente. Esto ocasiona que el módulo de finura en masa y en volumen sea prácticamente el mismo. Esto no sucede en el concreto ligero, debido a que las densidades específicas de los porcentajes retenidos se van incrementando a medida que se hace más fina la abertura de la malla e implica que, al realizar el cálculo del módulo de finura en masa y en volumen, estos difieran. Esto se ilustra en la tabla 3.1. Los valores de densidad específica de los retenidos más finos tienden a un valor parecido al de arenas de masa normal, por lo que el módulo de finura, en masa y en volumen, para una arena ligera que tenga un gran porcentaje de finos usualmente tiende a ser el mismo.

TABLA 3.1 COMPARACIÓN DEL MÓDULO DE FINURA POR MASA Y POR VOLUMEN DE UN AGREGADO LIGERO TÍPICO

Malla N°	Abertura (mm)	Porcentaje retenido en masa	Porcentaje retenido acumulado en masa	Densidad específica SSS	Porcentaje retenido en volumen	Porcentaje retenido acumulado en volumen
4	4,75	0	0	---	0	0
8	2,38	22	22	1,55	26	26
16	1,19	24	46	1,78	25	51
30	0,59	19	65	1,90	19	70
50	0,30	14	79	2,01	13	83
100	0,15	12	91	2,16	10	93
Pasa		9	100	2,40	7	100

SSS Condición Saturada Superficialmente Seca
Módulo de finura por masa = 3.03

Módulo de finura por volumen = 3.23

El empleo de arena de masa normal en la mezcla implica generalmente un incremento en la resistencia y el módulo de elasticidad, sin embargo, lo acompaña también un incremento en la masa.

3.1.3. Relación agua - cemento

En el concreto ligero, al igual que en el concreto de masa normal, la relación agua - cemento interviene en la resistencia que se desea obtener. A menor relación agua - cemento se obtienen las mayores resistencias. Sin embargo, el factor que predomina en la resistencia es el contenido de cemento ya que la cantidad de agua es difícil estimarla con exactitud debido a la alta absorción de los agregados.

Generalmente, cuando se emplean agregados ligeros en la mezcla de concreto, el contenido de cemento es mayor para lograr resistencias similares a las que se obtendrían usando agregados de masa normal.

3.1.4. Contenido de aire

El aire incorporado mejora la manejabilidad de la mezcla, mejora la resistencia a los ciclos de congelamiento – descongelamiento, disminuye el sangrado y trata de minimizar las deficiencias de la granulometría. Cuando las condiciones de exposición no son tan severas, el aire incorporado se podría omitir, sin embargo, una buena manejabilidad y cohesión se pueden lograr con porcentajes de aire mayores a 4%.

Para altos porcentajes de aire se puede ver afectada la resistencia del concreto ligero. Para un concreto con aire incorporado del 4% al 8% y un revenimiento de 125 mm o menor usualmente no experimenta dicho cambio. La incorporación del aire en estos porcentajes se logra, generalmente para este tipo de agregados, en la acción del mezclado, sin necesidad de incorporar un agente inclusor.

Para un tamaño máximo de agregado de 19 mm es recomendable un rango de contenido de aire de 4% a 8%, mientras que para 9,5 mm se recomienda entre 5% y 9%. Cuando el contenido de aire supera estos valores disminuye la resistencia a compresión del orden de 10 kg/cm² por cada punto porcentual que exceda.

3.2. PRIMERA ESTIMACIÓN DE LAS PROPORCIONES DE LA MEZCLA

Una primera estimación se puede lograr a partir de datos que se obtengan de laboratorio. La información que se da en este apartado tiene como base dicha información con la cual se pretendió establecer métodos para poder proporcionar las mezclas de concretos ligeros.

En la literatura se establecen dos métodos de proporcionamiento: por masa y por volumen. En este trabajo únicamente se incluye el método referente a la masa de los materiales, por considerarlo más sencillo de trabajar y por la similitud que se encuentra entre el procedimiento de este método y el que se usa tradicionalmente para el concreto normal. Ambos métodos llevan a un ajuste final de cantidades debido a que los factores de humedad y absorción son diferentes para cada material y tiempo.

3.2.1. Método de proporcionamiento por masa

Este método es aplicable para mezclas hechas con agregados gruesos ligeros, agregados finos ligeros y agregados finos de masa normal.

El método sigue la secuencia que se indica a continuación y se auxilia de tablas, que son resultado de mediciones en laboratorio, para los diferentes factores que intervienen.

Elección del revenimiento

El revenimiento es la propiedad del concreto con que se busca correlacionar la facilidad de colocación del material y la correcta consolidación en la estructura. Sin embargo, esta característica no ha garantizado la homogeneidad y consolidación del concreto en la estructura debido a que en el proceso de colocación interviene la mano de obra. Si el revenimiento no está especificado, la tabla 3.2 proporciona un rango de valores adecuados dependiendo del elemento estructural que se desea construir.

TABLA 3.2 REVENIMIENTO RECOMENDADO PARA DIFERENTES ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Elemento estructural	Revenimiento (mm)*	
	Máximo**	Mínimo**
Vigas y muros reforzados	100	25
Columnas	100	25
Sistemas de piso (losas)	75	25

* Si se desea un revenimiento mayor se pueden emplear aditivos para incrementarlo ya que estos no afectan la relación agua - cemento de la mezcla

** Cuando la compactación no se realiza con ayuda de un vibrador, los valores se pueden incrementar 25 mm

Selección del tamaño máximo de agregado

Un tamaño máximo de agregado bien graduado de mayor dimensión provoca en la mezcla menos cantidad de vacíos que uno de tamaño menor, lo que implica menos cantidad de pasta por unidad de volumen de concreto. Generalmente, un tamaño mayor lleva a diseños más económicos aunque debe de ser consistente con las dimensiones de la estructura. El tamaño máximo de agregado no debe exceder:

- Un quinto de la dimensión más pequeña del elemento.
- Una tercera parte del peralte en una losa.
- Tres cuartas partes del claro libre entre las barras o paquetes de barras.

Estas recomendaciones pueden ignorarse si se asegura la adecuada colocación del concreto. Si se desea obtener mezclas con una resistencia mayor, para una relación agua-cemento dada, se recomienda usar un tamaño máximo de agregado más pequeño, ya que esto incrementa la adherencia entre el mortero y el agregado.

Estimación del agua de la mezcla y el contenido de aire

La cantidad de agua por unidad de volumen para obtener el revenimiento deseado depende del tamaño máximo, de la forma y de la graduación del agregado, del contenido de aire y de los aditivos químicos que se empleen. No depende, en gran medida, de la cantidad de cemento.

La tabla 3.3 proporciona una estimación del agua requerida dependiendo del tamaño máximo de agregado y la cantidad de aire. La forma y la textura de los agregados influye en la cantidad de agua, pero los valores de la tabla dan una suficiente aproximación para esta primera estimación.

TABLA 3.3 REQUERIMIENTOS APROXIMADOS DE AGUA EN LA MEZCLA PARA DIFERENTES REVENIMIENTOS Y TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADO*

Tamaño máximo de agregado	9,5 mm	12,7 mm	19,0 mm
Concreto con aire incluido			
	Agua, kg/m³ de concreto		
Revenimiento, 25 mm a 50 mm	181	175	166
Revenimiento, 75 mm a 100 mm	202	193	181
Revenimiento, 125 mm a 150 mm	211	199	187
Concreto sin aire incluido			
	Agua, kg/m³ de concreto		
Revenimiento, 25 mm a 50 mm	208	199	187
Revenimiento, 75 mm a 100 mm	228	217	202
Revenimiento, 125 mm a 150 mm	237	222	208

* Estos valores toman en cuenta que la exposición del concreto va a ser moderada, es decir que no estará expuesto a condiciones severas de temperatura. El uso de aditivos reductores de agua disminuye estas cantidades según especificaciones del fabricante. Para lograr concretos con un revenimiento mayor a 175 mm es necesario el uso de aditivos químicos y se recomienda no usar agregados que tengan un tamaño máximo nominal mayor a 25 mm.

La tabla 3.4 muestra los niveles recomendados de contenido de aire con respecto a la exposición que tendrá el concreto en servicio. Estos valores mejoran el manejo y la durabilidad de la mezcla, además reducen la masa de la misma.

TABLA 3.4 CONTENIDO TOTAL DE AIRE RECOMENDADO PARA DIFERENTES NIVELES DE EXPOSICIÓN

Tamaño máximo de agregado	9,5 mm	12,7 mm	19,0 mm
	Contenido total de aire recomendado** para diferentes niveles de exposición, %		
Exposición ligera	4,5	4,0	4,0
Exposición moderada	6,0	5,5	5,0
Exposición extrema	7,5	7,0	6,0

** Al momento de realizar la mezcla de concreto siempre se queda con cierto porcentaje de aire, estos valores se pueden estimar con cierta precisión de la siguiente forma: en el agregado de 9,5 mm se tiene 3%; en el agregado de 12,7 mm se tiene 2,5% y en el agregado de 19,0 mm se tiene 2%

Selección de la relación aproximada agua - cemento

En la relación agua - cemento w/c a emplear, no solo interviene la resistencia requerida sino también factores como la durabilidad y las propiedades finales deseadas. Dado que, cuando se utilizan diferentes agregados y cementantes con la misma relación agua - cemento resultan diferentes resistencias, es deseable desarrollar una relación entre la resistencia y w/c para cada material que se utilice. En ausencia de este dato, se pueden tomar conservadoramente los datos de la tabla 3.5. Por otro lado, esta relación no debe ser menor que lo que indica la tabla 3.6 en exposiciones severas.

TABLA 3.5 RELACIÓN ENTRE w/c Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO*

Resistencia a compresión a 28 días (MPa)	Relación aproximada agua - cemento, por masa	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
41,4	0,41	---
34,5	0,48	0,40
27,6	0,57	0,48
20,7	0,68	0,59
13,8	0,82	0,74

* Los valores de esta tabla asumen que el tamaño máximo de agregado se encuentra dentro del rango de los 19 mm y los 25 mm, si el tamaño máximo es menor estos valores se pueden incrementar.

TABLA 3.6 RELACIÓN AGUA - CEMENTO MÁXIMA PERMISIBLE

Tipo de estructura	Estructura	
	continuamente mojada o expuesta frecuentemente a congelación y deshielo	Estructura expuesta al agua de mar o a sulfatos
Secciones esbeltas	0,45	0,40**
Todas las demás	0,50	0,45**

** Si se utiliza cemento resistente a sulfatos este valor se puede incrementar 0,05

Cálculo del contenido de cemento

Debido a que ya se tiene el valor recomendado de la relación agua - cemento w/c así como la masa del agua, se puede obtener fácilmente la cantidad de cemento a emplear simplemente despejando.

Estimación del contenido del agregado grueso ligero

Agregados con el mismo tamaño máximo nominal y graduación producen concretos con una manejabilidad satisfactoria con un apropiado volumen de agregado grueso. La tabla 3.7 proporciona una estimación de dicho volumen. Este valor depende únicamente del tamaño máximo de agregado y del módulo de finura del agregado fino.

TABLA 3.7 VOLUMEN DE AGREGADO GRUESO POR UNIDAD DE VOLUMEN DE CONCRETO

Tamaño máximo de agregado, (mm)	Volumen de agregado grueso suelto secado en horno* por unidad de volumen de concreto para diferentes módulos de finura de la arena			
	2,40	2,60	2,80	3,00
9,5	0,58	0,56	0,54	0,52
12,7	0,67	0,65	0,63	0,61
19,0	0,74	0,72	0,70	0,68

* Estas relaciones empíricas fueron seleccionadas al producir mezclas con una manejabilidad satisfactoria en construcciones de concreto reforzado. Si se requiere un concreto más manejable, como cuando se tiene que bombear, estos valores se pueden reducir en un 10%

El volumen que arroja la tabla son metros cúbicos de grava por cada metro cúbico de concreto, para convertirlo a kilogramos por cada metro cúbico de concreto se debe multiplicar por su masa volumétrica suelta secada en horno.

Estimación del contenido del agregado fino

Hasta el paso anterior, ya se cuenta con las cantidades de todos los componentes de la mezcla excepto el agregado fino. A la determinación de la cantidad de arena se puede llegar por dos caminos que resultan al final en determinar el valor por diferencia. El primer camino se refiere a que en ocasiones por experiencias en este tipo de mezclas se puede conocer la masa volumétrica con suficiente aproximación y una vez teniendo este valor, se determina la masa por diferencia. En ausencia de dichas experiencias, se puede recurrir a la tabla 3.8 que proporciona una primera estimación basada en el factor de gravedad específica del agregado grueso y el contenido de aire.

TABLA 3.8 PRIMERA ESTIMACIÓN DE LA MASA VOLUMÉTRICA DEL CONCRETO LIGERO FRESCO COMPUESTO POR AGREGADO GRUESO LIGERO Y ARENA DE MASA NORMAL

Factor de gravedad específica	Primera estimación de la masa volumétrica del concreto ligero, kg/m ³		
	Concreto con aire incluido		
	4%	6%	8%
1,00	1596	1561	1519
1,20	1680	1644	1608

TABLA 3.8 PRIMERA ESTIMACIÓN DE LA MASA VOLUMÉTRICA DEL CONCRETO LIGERO FRESCO COMPUESTO POR AGREGADO GRUESO LIGERO Y ARENA DE MASA NORMAL

Factor de gravedad específica	Primera estimación de la masa volumétrica del concreto ligero, kg/m ³		
	Concreto con aire incluido		
	4%	6%	8%
1,40	1769	1727	1691
1,60	1852	1810	1775
1,80	1935	1899	1858
2,00	2024	1982	1941

El factor de gravedad específica está definido como la masa unitaria del material dividida entre la masa unitaria del agua.

3.3. AJUSTE EN LAS PROPORCIONES DE LA MEZCLA

Este ajuste se da básicamente en la cantidad de agua empleada. Hasta ahora, los agregados se han trabajado en el supuesto de que no absorberán ni aportarán agua a la mezcla, sin embargo, generalmente se encuentran con cierto porcentaje tanto de absorción como de humedad. Esto implica que el procedimiento diferirá de las condiciones reales, por lo que implicará un ajuste en la cantidad de agua utilizada.

Una vez que se tienen los porcentajes de humedad y absorción se determina la cantidad de agua que aportará o absorberá cada agregado y se toma en cuenta esta cantidad en el valor obtenido anteriormente de la cantidad de agua.

De esta forma se obtiene una primera estimación de las cantidades a emplear en la mezcla de concretos con agregados ligeros, las cuales se tendrán que ajustar con base en los resultados obtenidos en el laboratorio.

BIBLIOGRAFÍA

- **American Concrete Institute (1998).** “ACI 211.2-98 Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete”.
- <http://www.imcyc.com.mx/cyt/febrero03/autocompactable.htm>
- **A. M. Neville (1975).** “Properties of Concrete” Pitman Publishing

4. CARACTERIZACIÓN DEL CONCRETO LIGERO

El estudio experimental se realiza para conocer las propiedades mecánicas de este tipo de concreto y poder emplearlas en un ejemplo que se ilustrará posteriormente, así como establecer una comparación con el concreto de masa normal.

Se realizaron las mezclas para dos tipos de agregados ligeros (pómez y tezontle) y para uno comúnmente usado en la construcción (andesita). El procedimiento empleado se describe, a grandes rasgos, a continuación:

- Se analizaron los materiales a emplear en las mezclas.
- Se elaboraron prediseños y muestras a escala menor para observar la manejabilidad del producto y pruebas de revenimiento.
- Se ajustaron los diseños seleccionados para elaborar muestras a una escala suficiente y caracterizar las mezclas.
- Se realizaron las siguientes pruebas: resistencia a compresión, resistencia a tensión por compresión diametral, módulo de elasticidad y relación de Poisson.
- Se analizaron y procesaron los resultados obtenidos.

Este procedimiento se realizó para tres tipos de concreto: de baja resistencia, de resistencia media y de resistencia estructural.

4.1. DISEÑO DE MEZCLAS

A manera de ejemplo, a continuación se mostrará el cálculo realizado para una de las mezclas, cuyos datos son los siguientes:

<u>Agregado grueso: Pómez</u>			<u>Agregado fino: Pómez</u>	
TMA =	19,0	mm	MF =	3,3
MVSS =	366,0	kg/m ³	Densidad =	1,660
Densidad =	0,840		Absorción =	0,596
Absorción =	0,658		Humedad =	0,472
Humedad =	0,551			

donde:

TMA	Tamaño máximo de agregado
MVSS	Masa volumétrica seca suelta
MF	Módulo de finura

Elección del revenimiento

Para las estructuras convencionales se ha comprobado que con un revenimiento de 7,5 a 10 cm se logra una adecuada colocación del concreto y es trabajable.

Selección del tamaño máximo de agregado

El tamaño máximo de agregado se elige dependiendo del elemento que se pretende fabricar y se deben cumplir las restricciones antes mencionadas. Es común emplear el valor de 19 mm ya que para las dimensiones que usualmente se manejan es apropiado.

Estimación del agua de la mezcla y el contenido de aire

De la tabla 3.3 se puede estimar la cantidad de agua necesaria para un revenimiento y tamaño máximo de agregado.

Pensando que el concreto será expuesto a condiciones extremas, pero además tomando en cuenta que con este tipo de agregados se obtiene un porcentaje de aire considerable sólo en el mezclado, se adopta el valor de 6% de porcentaje de aire incluido.

Tamaño máximo de agregado	9,5 mm	12,7 mm	19,0 mm
Concreto con aire incluido			
	Agua, kg/m³ de concreto		
Revenimiento, 25 mm a 50 mm	181	175	166
Revenimiento, 75 mm a 100 mm	202	193	181
Revenimiento, 125 mm a 150 mm	211	199	187
Concreto sin aire incluido			
	Agua, kg/m³ de concreto		
Revenimiento, 25 mm a 50 mm	208	199	187
Revenimiento, 75 mm a 100 mm	228	217	202
Revenimiento, 125 mm a 150 mm	237	222	208

$$w = 181 \frac{kg}{m^3}$$

Tamaño máximo de agregado	9,5 mm	12,7 mm	19,0 mm
Contenido total de aire recomendado** para diferentes niveles de exposición, %			
Exposición suave	4,5	4,0	4,0
Exposición moderada	6,0	5,5	5,0
Exposición extrema	7,5	7,0	6,0

Selección de la relación aproximada agua - cemento

Para una resistencia deseada de 250 kg/cm² (25 MPa), interpolando en la tabla 3.5 obtenemos que:

Resistencia a compresión a 28 días (MPa)	Relación aproximada agua - cemento, por peso	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
41,4	0,41	---
34,5	0,48	0,40
27,6	0,57	0,48
20,7	0,68	0,59
13,8	0,82	0,74

$$\frac{w}{c} = 0,52$$

Cálculo del contenido de cemento

$$\frac{w}{c} = 0,52 \quad c = \frac{w}{0,52} = \frac{181}{0,52} = 346 \frac{kg}{m^3}$$

Estimación del contenido del agregado grueso ligero

La tabla 3.7 proporciona un valor estimado del contenido de agregado grueso que lo relaciona con el módulo de finura del agregado fino. Para este caso se extrapola de la tabla ya que el módulo de finura es de 3,30.

Tamaño máximo de agregado, (mm)	Volumen de agregado grueso suelto secado en horno* por unidad de volumen de concreto para diferentes módulos de finura de la arena			
	2,40	2,60	2,80	3,00
9,5	0,58	0,56	0,54	0,52
12,7	0,67	0,65	0,63	0,61
19,0	0,74	0,72	0,70	0,68

$$g = 0,65 \frac{m^3_{grava}}{m^3_{concreto}} \quad g = 0,65 \frac{m^3_{grava}}{m^3_{concreto}} \left[\left(366 \frac{kg}{m^3_{grava}} \right) (1 + 0,658) \right] = 392 \frac{kg}{m^3_{concreto}}$$

Esta cantidad de grava se ve afectada por la absorción ya que la tabla nos proporciona un volumen de agregado grueso suelto secado al horno y tenemos que llevarla a un volumen del estado en el que realmente se encuentra.

Estimación del contenido del agregado fino

La cantidad de agregado fino se obtiene entonces por diferencia:

MATERIAL	W (kg/m³)	V (L)
Agua (<i>w</i>)	181	181
Cemento (<i>c</i>)	346	111
Grava (<i>g</i>)	392	467
Aire		60
Arena (<i>A</i>)	"A"	"A"
<hr/>		
Total		1000

$$A (L) = 1000 - (181 + 111 + 467 + 60) = 181 L$$

$$A \left(\frac{kg}{m^3} \right) = 181(1,66) = 300 \frac{kg}{m^3}$$

Por tanto, la tabla queda como:

MATERIAL	W (kg/m³)	V (L)
Agua (<i>w</i>)	181	181
Cemento (<i>c</i>)	346	111
Grava (<i>g</i>)	392	467
Aire		60
Arena (<i>A</i>)	300	181
<hr/>		
Total	1220	1000

Ajuste en las proporciones de la mezcla

$$\% h_{grava} = 55,1\%$$

$$\% h_{arena} = 47,2\%$$

$$\% a_{grava} = 65,8\%$$

$$\% a_{arena} = 59,6\%$$

$$w_{nec} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = w - g \left(\frac{1 + \% h_{grava}}{1 + \% a_{grava}} - 1 \right) - A \left(\frac{1 + \% h_{arena}}{1 + \% a_{arena}} - 1 \right) = 181 - 392 \left(\frac{1,551}{1,658} - 1 \right) - 300 \left(\frac{1,472}{1,596} - 1 \right) = 230 \frac{kg}{m^3}$$

donde:

$\%h_{grava}$ porcentaje de humedad de la grava

$\%h_{arena}$ porcentaje de humedad de la arena

$\%a_{grava}$ porcentaje de absorción de la grava

$\%a_{arena}$ porcentaje de absorción de la arena

$$g_{nec} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = g \left(\frac{1 + \%h_{grava}}{1 + \%a_{grava}} \right) = 392 \left(\frac{1,551}{1,658} \right) = 367 \frac{kg}{m^3}$$

$$A_{nec} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = A \left(\frac{1 + \%h_{arena}}{1 + \%a_{arena}} \right) = 300 \left(\frac{1,472}{1,596} \right) = 277 \frac{kg}{m^3}$$

Finalmente la tabla resumen es la siguiente:

MATERIAL	W (kg/m ³)	V (L)
Agua (w)	230	230
Cemento (c)	346	111
Grava (g)	367	437
Aire		60
Arena (A)	277	167
Total	1220	1004

4.2. TIPOS DE CONCRETO LIGERO

Se realizaron las siguientes mezclas:

Concreto de baja resistencia

CLAVE	AGREGADO GRUESO	AGREGADO FINO	ADITIVO
CAL-01	Pómez	Pómez	Inclisor de aire al 6%
CAL-02	Pómez	Pómez	Inclisor de aire al 6%
CAL-03	Tezontle	Pómez	Inclisor de aire al 6%
CAL-04	Tezontle	Pómez	Inclisor de aire al 6%
CAL-05	Tezontle	Tezontle	Inclisor de aire al 6%
CAL-06	Tezontle	Tezontle	Inclisor de aire al 6%
CAL-07	Andesita	Andesita	Espumante al 20%
CAL-08	Andesita	Andesita	Espumante al 20%

Concreto de resistencia media

CLAVE	AGREGADO GRUESO	AGREGADO FINO	ADITIVO
CL-01	Pómez	Pómez	Sin aditivo
CL-02	Pómez	Pómez	Sin aditivo
CL-03	Tezontle	Pómez	Sin aditivo
CL-04	Tezontle	Pómez	Sin aditivo
CL-05	Tezontle	Tezontle	Sin aditivo
CL-06	Tezontle	Tezontle	Sin aditivo

Concreto de resistencia estructural

CLAVE	AGREGADO GRUESO	AGREGADO FINO	ADITIVO
XL-01	Pómez	Pómez	Sin aditivo
XL-02	Pómez	Pómez	Sin aditivo
XL-03	Tezontle	Pómez	Sin aditivo
XL-04	Tezontle	Pómez	Sin aditivo
XL-05	Tezontle	Tezontle	Sin aditivo
XL-06	Tezontle	Tezontle	Sin aditivo

4.3. RESISTENCIA A COMPRESIÓN

A continuación se muestra una tabla con los resultados obtenidos a 28 días para los diferentes concretos analizados:

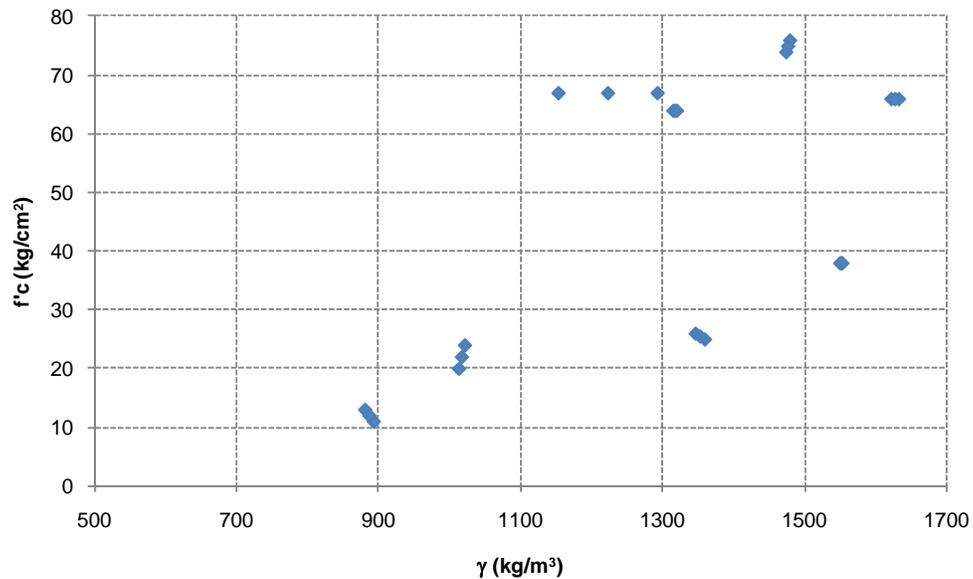
TABLA 4.1. RESISTENCIA A COMPRESIÓN (28 DÍAS) CONCRETOS DE BAJA RESISTENCIA

Espécimen	Resistencia a Compresión (kg/cm ²)	Masa Unitaria Concreto Endurecido (kg/m ³)	AGREGADO
CAL-01-07	11	894	
CAL-01-08	13	882	PÓMEZ/PÓMEZ
CAL-01-15	12	888	
CAL-02-07	20	1014	
CAL-02-08	24	1022	PÓMEZ/PÓMEZ
CAL-02-15	22	1018	
CAL-03-10	67	1293	
CAL-03-11	67	1153	TEZONTLE/PÓMEZ
CAL-03-15	67	1223	
CAL-04-10	64	1315	
CAL-04-11	64	1320	TEZONTLE/PÓMEZ
CAL-04-15	64	1318	
CAL-05-07	25	1360	
CAL-05-08	26	1346	TEZONTLE/TEZONTLE

TABLA 4.1. RESISTENCIA A COMPRESIÓN (28 DÍAS) CONCRETOS DE BAJA RESISTENCIA

Espécimen	Resistencia a Compresión (kg/cm ²)	Masa Unitaria Concreto Endurecido (kg/m ³)	AGREGADO
CAL-05-15	26	1353	
CAL-06-07	74	1474	TEZONTLE/TEZONTLE
CAL-06-08	76	1479	
CAL-06-15	75	1476	
CAL-07-07	38	1550	ANDESITA MÁS ADITIVO INCLUSOR DE AIRE
CAL-07-08	38	1553	
CAL-07-15	38	1551	
CAL-08-07	66	1632	ANDESITA MÁS ADITIVO INCLUSOR DE AIRE
CAL-08-08	66	1622	
CAL-08-15	66	1627	

CONCRETOS DE BAJA RESISTENCIA

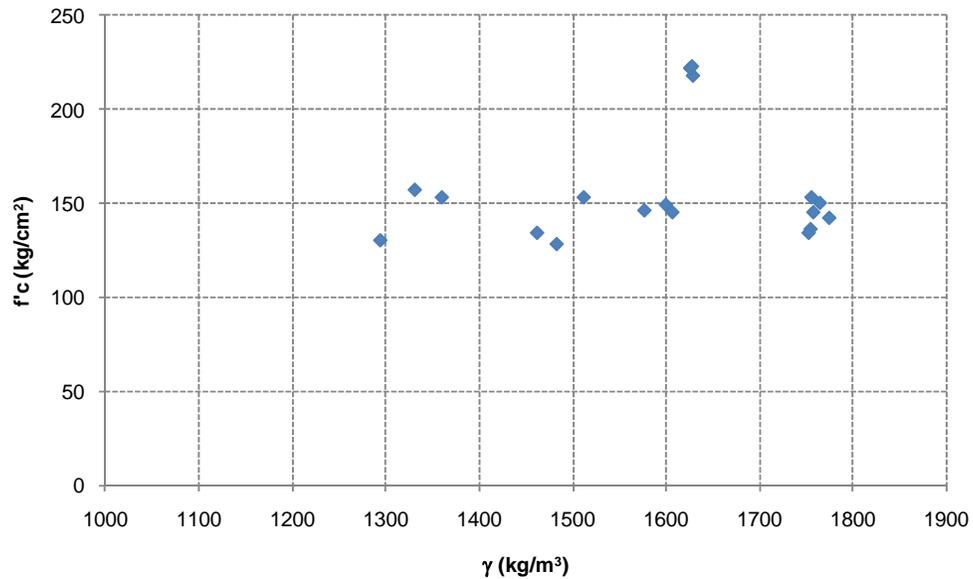


GRAFICA 4.1. MASA VOLUMÉTRICA VS. RESISTENCIA A COMPRESIÓN CONCRETOS DE BAJA RESISTENCIA

TABLA 4.2. RESISTENCIA A COMPRESIÓN (28 DÍAS) CONCRETOS DE RESISTENCIA MEDIA

Espécimen	Resistencia a Compresión (kg/cm ²)	Masa Unitaria Concreto Endurecido (kg/m ³)	AGREGADO
CL-01-10	130	1294	
CL-01-11	128	1483	PÓMEZ/PÓMEZ
CL-01-12	134	1462	
CL-02-10	153	1360	
CL-02-11	153	1512	PÓMEZ/PÓMEZ
CL-02-12	157	1331	
CL-03-10	146	1577	
CL-03-11	145	1607	TEZONTLE/PÓMEZ
CL-03-12	149	1600	
CL-04-10	218	1629	
CL-04-11	222	1626	TEZONTLE/PÓMEZ
CL-04-12	223	1628	
CL-05-10	136	1755	
CL-05-11	134	1753	TEZONTLE/TEZONTLE
CL-05-12	142	1775	
CL-06-10	150	1765	
CL-06-11	153	1756	TEZONTLE/TEZONTLE
CL-06-12	145	1758	

CONCRETOS DE RESISTENCIA MEDIA

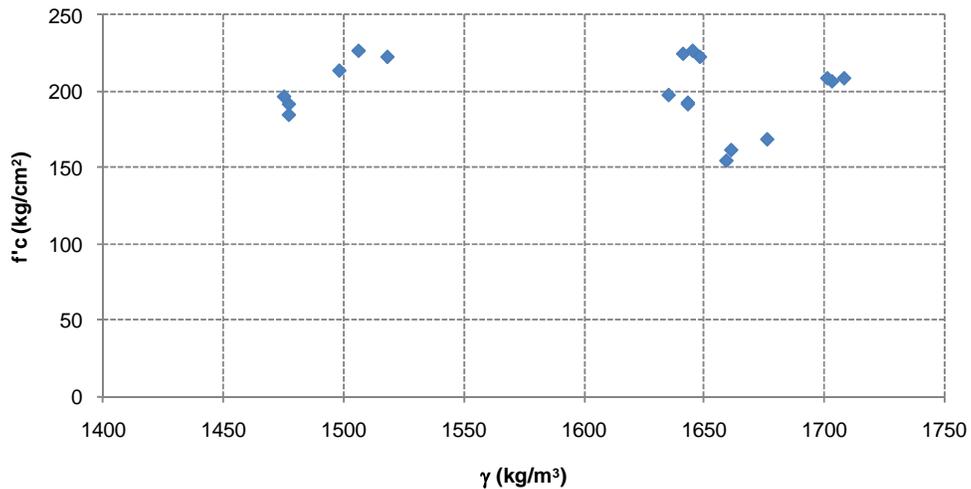


GRAFICA 4.2. MASA VOLUMÉTRICA VS. RESISTENCIA A COMPRESIÓN CONCRETOS DE RESISTENCIA MEDIA

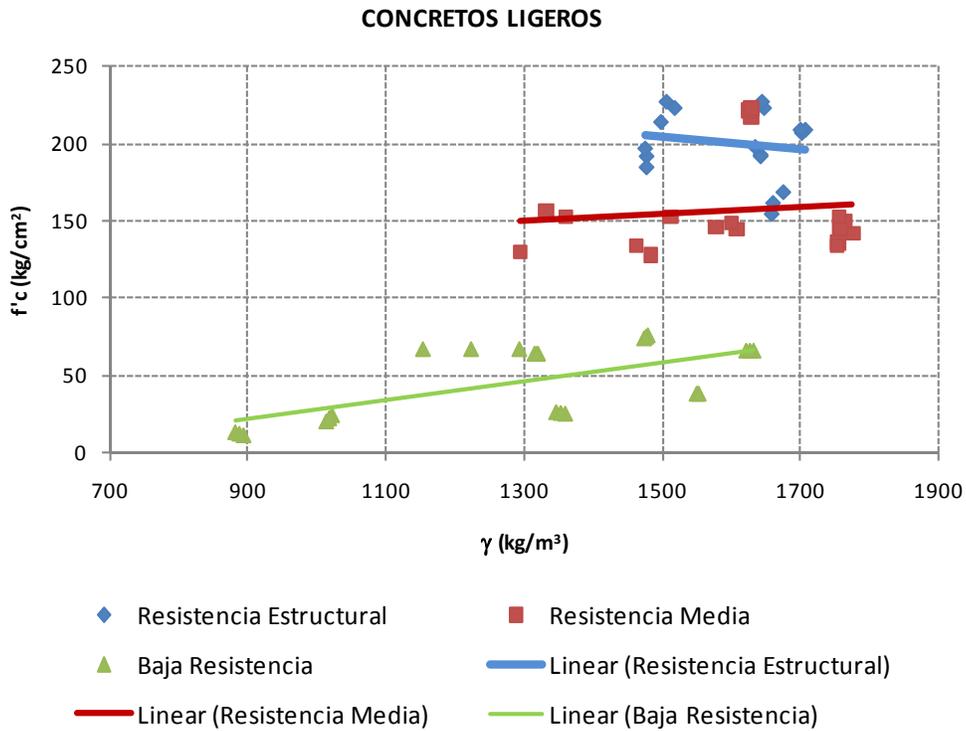
TABLA 4.3. RESISTENCIA A COMPRESIÓN (28 DÍAS) CONCRETOS DE RESISTENCIA ESTRUCTURAL

Espécimen	Resistencia a Compresión (kg/cm ²)	Masa Unitaria Concreto Endurecido (kg/m ³)	AGREGADO
XL-01-02	192	1477	PÓMEZ/PÓMEZ
XL-01-04	197	1475	
XL-01-10	185	1477	
XL-02-04	227	1506	PÓMEZ/PÓMEZ
XL-02-05	223	1518	
XL-02-08	214	1498	
XL-03-02	193	1643	TEZONTLE/PÓMEZ
XL-03-07	198	1635	
XL-03-10	192	1643	
XL-04-04	223	1648	TEZONTLE/PÓMEZ
XL-04-05	225	1641	
XL-04-06	227	1645	
XL-05-01	162	1661	TEZONTLE/TEZONTLE
XL-05-06	155	1659	
XL-05-09	169	1676	
XL-06-01	209	1708	TEZONTLE/TEZONTLE
XL-06-09	207	1703	
XL-06-10	209	1701	

CONCRETOS DE RESISTENCIA ESTRUCTURAL



GRAFICA 4.3. MASA VOLUMÉTRICA VS. RESISTENCIA A COMPRESIÓN CONCRETOS DE RESISTENCIA ESTRUCTURAL



GRAFICA 4.4. MASA VOLUMÉTRICA VS. RESISTENCIA A COMPRESIÓN CONCRETOS LIGEROS

4.4. RESISTENCIA A TENSIÓN

A continuación se muestra una tabla con los resultados obtenidos a 28 días para los diferentes concretos analizados:

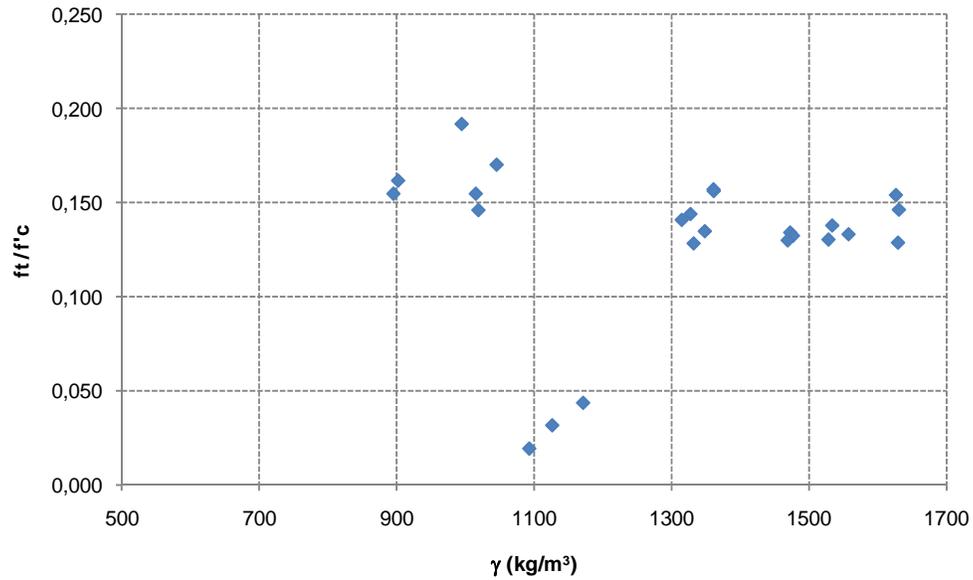
TABLA 4.4. RESISTENCIA A TENSIÓN (28 DÍAS) CONCRETOS DE BAJA RESISTENCIA

Espécimen	Resistencia a Tensión (kg/cm ²)	Masa Unitaria Concreto Endurecido (kg/m ³)	AGREGADO
CAL-01-12	1,7	895	PÓMEZ/PÓMEZ
CAL-01-13	2,1	902	
CAL-01-14	2,3	995	
CAL-02-12	3,4	1045	PÓMEZ/PÓMEZ
CAL-02-13	3,5	1019	
CAL-02-14	3,4	1015	
CAL-03-07	2,9	1171	TEZONTLE/PÓMEZ
CAL-03-08	2,1	1126	
CAL-03-09	2,5	1093	
CAL-04-07	8,2	1332	TEZONTLE/PÓMEZ
CAL-04-08	9,2	1327	

TABLA 4.4. RESISTENCIA A TENSIÓN (28 DÍAS) CONCRETOS DE BAJA RESISTENCIA

Espécimen	Resistencia a Tensión (kg/cm ²)	Masa Unitaria Concreto Endurecido (kg/m ³)	AGREGADO
CAL-04-09	9,0	1314	
CAL-05-12	3,9	1361	
CAL-05-13	3,5	1348	TEZONTLE/TEZONTLE
CAL-05-14	4,0	1361	
CAL-06-12	9,9	1472	
CAL-06-13	10,0	1476	TEZONTLE/TEZONTLE
CAL-06-14	9,7	1468	
CAL-07-12	4,9	1528	
CAL-07-13	5,1	1557	ANDESITA MÁS ADITIVO INCLUSOR DE AIRE
CAL-07-14	5,2	1533	
CAL-08-12	8,5	1629	
CAL-08-13	9,6	1630	ANDESITA MÁS ADITIVO INCLUSOR DE AIRE
CAL-08-14	10,2	1626	

CONCRETOS DE BAJA RESISTENCIA

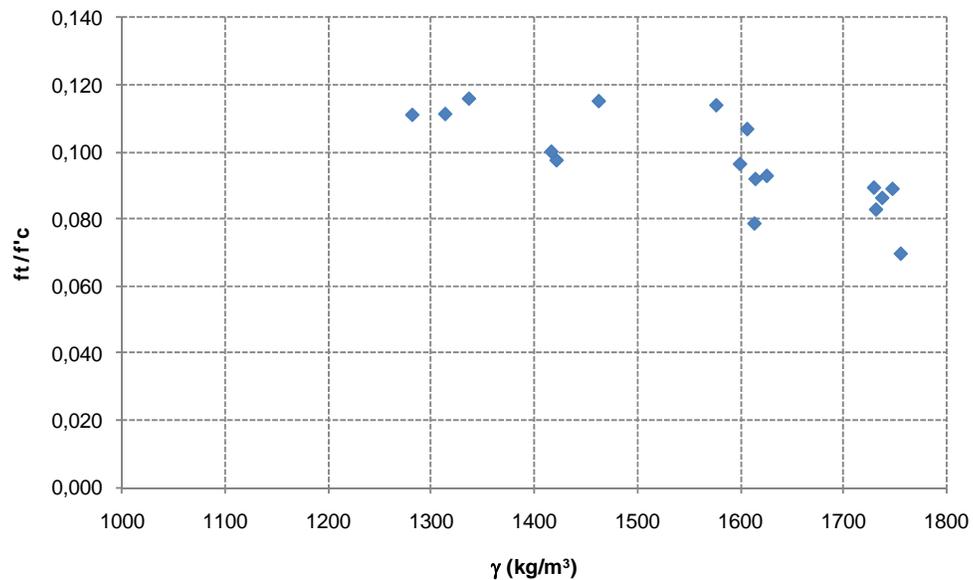


GRAFICA 4.5. MASA VOLUMÉTRICA VS. RELACIÓN RESISTENCIA A TENSIÓN Y COMPRESIÓN CONCRETOS DE BAJA RESISTENCIA

TABLA 4.5. RESISTENCIA A TENSIÓN (28 DÍAS) CONCRETOS DE RESISTENCIA MEDIA

Espécimen	Resistencia a Tensión (kg/cm ²)	Masa Unitaria Concreto Endurecido (kg/m ³)	AGREGADO
CL-01-13	14,7	1282	PÓMEZ/PÓMEZ
CL-01-14	14,2	1314	
CL-01-15	14,9	1417	
CL-02-13	15,3	1463	PÓMEZ/PÓMEZ
CL-02-14	17,6	1422	
CL-02-15	15,3	1337	
CL-03-13	16,9	1577	TEZONTLE/PÓMEZ
CL-03-14	16,5	1607	
CL-03-15	15,9	1600	
CL-04-13	21,0	1615	TEZONTLE/PÓMEZ
CL-04-14	20,4	1626	
CL-04-15	20,7	1614	
CL-05-13	10,7	1732	TEZONTLE/TEZONTLE
CL-05-14	11,1	1756	
CL-05-15	9,9	1730	
CL-06-13	13,4	1738	TEZONTLE/TEZONTLE
CL-06-14	13,2	1748	
CL-06-15	12,9	1735	

CONCRETOS DE RESISTENCIA MEDIA

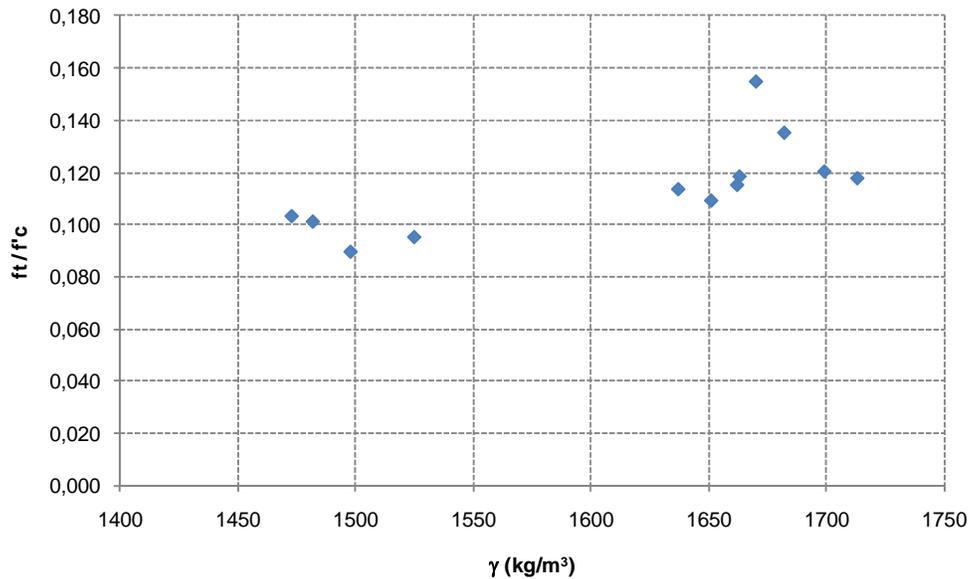


GRAFICA 4.6. MASA VOLUMÉTRICA VS. RELACIÓN RESISTENCIA A TENSIÓN Y COMPRESIÓN CONCRETOS DE RESISTENCIA MEDIA

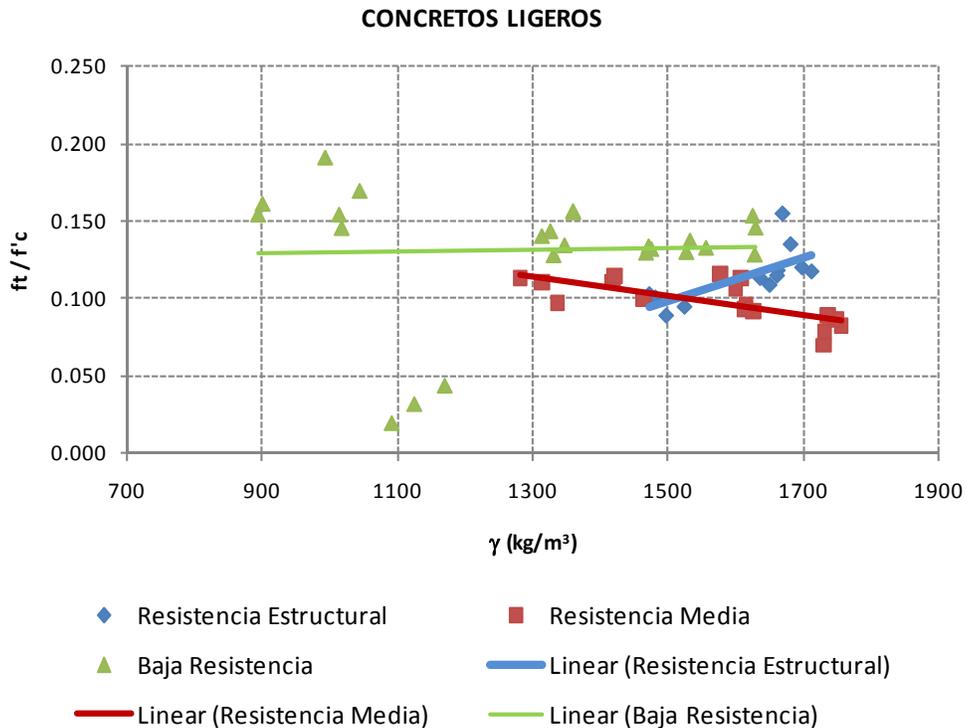
TABLA 4.6. RESISTENCIA A TENSIÓN (28 DÍAS) CONCRETOS DE RESISTENCIA ESTRUCTURAL

Espécimen	Resistencia a Tensión (kg/cm ²)	Masa Unitaria Concreto Endurecido (kg/m ³)	AGREGADO
XL-01-01	19,8	1473	PÓMEZ/PÓMEZ
XL-01-08	19,9	1482	
XL-02-01	20,3	1498	PÓMEZ/PÓMEZ
XL-02-03	21,2	1525	
XL-03-03	21,9	1637	TEZONTLE/PÓMEZ
XL-03-04	21,6	1651	
XL-04-08	26,4	1663	TEZONTLE/PÓMEZ
XL-04-09	25,9	1662	
XL-05-07	21,9	1682	TEZONTLE/TEZONTLE
XL-05-08	24,0	1670	
XL-06-02	24,6	1713	TEZONTLE/TEZONTLE
XL-06-06	24,9	1699	

CONCRETOS DE RESISTENCIA ESTRUCTURAL



GRAFICA 4.7. MASA VOLUMÉTRICA VS. RELACIÓN RESISTENCIA A TENSIÓN Y COMPRESIÓN CONCRETOS DE RESISTENCIA ESTRUCTURAL



GRAFICA 4.8. MASA VOLUMÉTRICA VS. RELACIÓN RESISTENCIA A TENSIÓN Y COMPRESIÓN CONCRETOS LIGEROS

4.5. MÓDULO DE ELASTICIDAD Y RELACIÓN DE POISSON

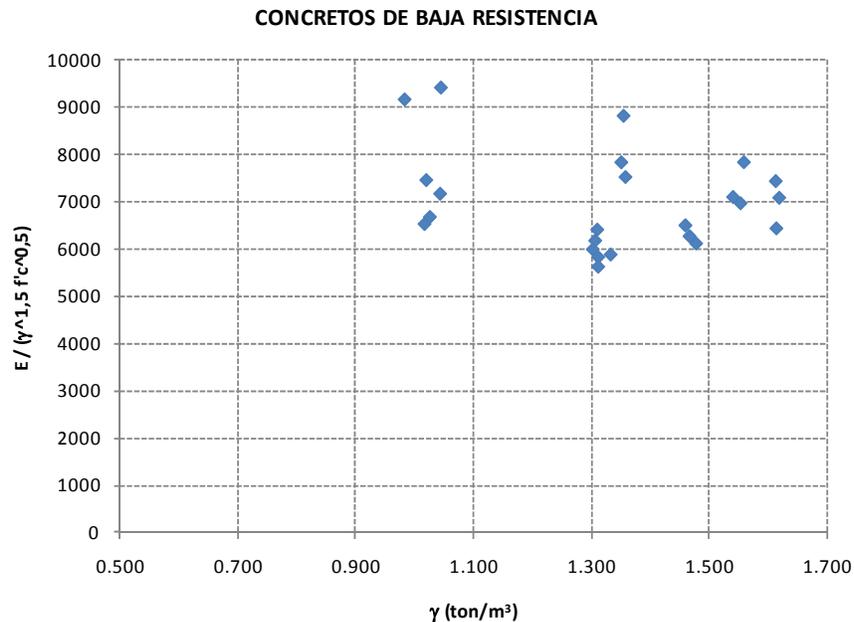
A continuación se muestra una tabla con los resultados obtenidos a 28 días para los diferentes concretos analizados:

TABLA 4.7. MÓDULO DE ELASTICIDAD Y RELACIÓN DE POISSON (28 DÍAS) CONCRETOS DE BAJA RESISTENCIA

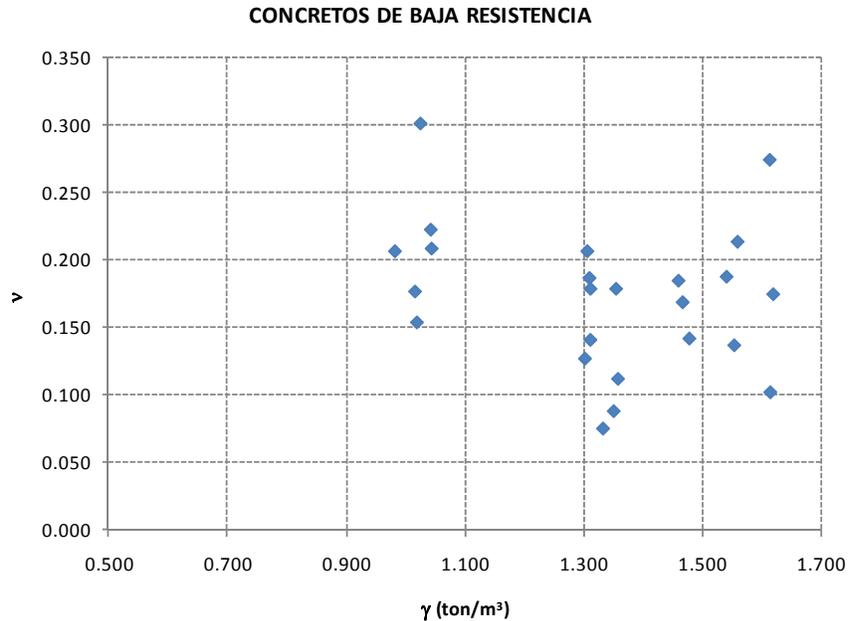
Espécimen	Resistencia a Compresión (kg/cm ²)	Módulo de Elasticidad (kg/cm ²)	Relación de Poisson	Masa Unitaria Concreto Endurecido (ton/m ³)	AGREGADO
CAL-01-09	11	29607	0,207	0,982	PÓMEZ/PÓMEZ
CAL-01-10	13	36238	0,209	1,044	
CAL-01-11	12	26500	0,223	1,043	
CAL-02-09	20	34386	0,154	1,019	PÓMEZ/PÓMEZ
CAL-02-10	24	32859	0,177	1,016	
CAL-02-11	22	32602	0,302	1,025	
CAL-03-12	67	73223	0,127	1,303	TEZONTLE/PÓMEZ
CAL-03-13	67	72004	0,179	1,312	
CAL-03-14	67	74441	0,075	1,334	

TABLA 4.7. MÓDULO DE ELASTICIDAD Y RELACIÓN DE POISSON (28 DÍAS) CONCRETOS DE BAJA RESISTENCIA

Espécimen	Resistencia a Compresión (kg/cm ²)	Módulo de Elasticidad (kg/cm ²)	Relación de Poisson	Masa Unitaria Concreto Endurecido (ton/m ³)	AGREGADO
CAL-04-12	64	77170	0,187	1,311	TEZONTLE/PÓMEZ
CAL-04-13	64	67928	0,141	1,312	
CAL-04-14	64	74103	0,207	1,307	
CAL-05-09	25	69644	0,179	1,356	TEZONTLE/TEZONTLE
CAL-05-10	26	60873	0,112	1,359	
CAL-05-11	26	62266	0,088	1,352	
CAL-06-09	74	99037	0,185	1,461	TEZONTLE/TEZONTLE
CAL-06-10	76	97559	0,169	1,468	
CAL-06-11	75	95639	0,142	1,479	
CAL-07-09	38	83492	0,137	1,555	ANDESITA MÁS ADITIVO INCLUSOR DE AIRE
CAL-07-10	38	94351	0,214	1,561	
CAL-07-11	38	84024	0,188	1,542	
CAL-08-09	66	119045	0,175	1,621	ANDESITA MÁS ADITIVO INCLUSOR DE AIRE
CAL-08-10	66	107746	0,102	1,616	
CAL-08-11	66	124251	0,275	1,615	



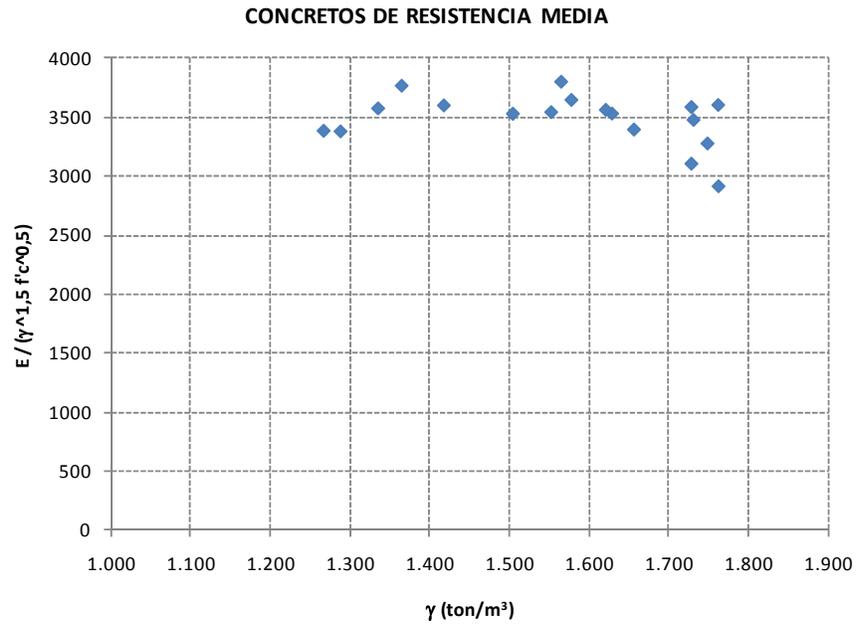
GRAFICA 4.9. MASA VOLUMÉTRICA VS. CONSTANTE RELACIONADA AL MÓDULO DE ELASTICIDAD CONCRETOS DE BAJA RESISTENCIA



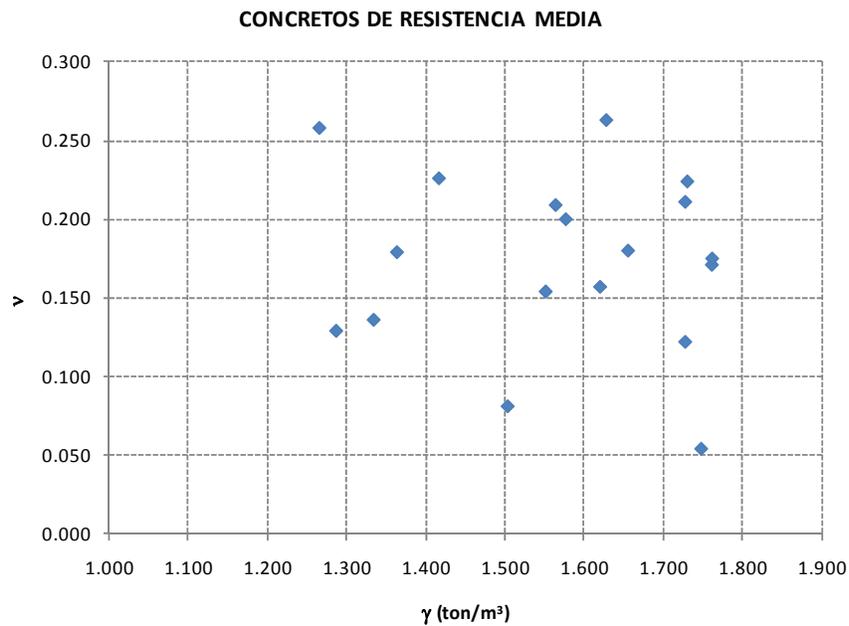
GRAFICA 4.10. MASA VOLUMÉTRICA VS. RELACIÓN DE POISSON CONCRETOS DE BAJA RESISTENCIA

TABLA 4.8. MÓDULO DE ELASTICIDAD Y RELACIÓN DE POISSON (28 DÍAS) CONCRETOS DE RESISTENCIA MEDIA

Espécimen	Resistencia a Compresión (kg/cm ²)	Módulo de Elasticidad (kg/cm ²)	Relación de Poisson	Masa Unitaria Concreto Endurecido (ton/m ³)	AGREGADO
CL-01-04	130	74157	0,081	1,504	
CL-01-05	128	55788	0,129	1,287	PÓMEZ/PÓMEZ
CL-01-06	134	55752	0,258	1,266	
CL-02-04	153	74171	0,179	1,364	
CL-02-05	153	68106	0,136	1,335	PÓMEZ/PÓMEZ
CL-02-06	157	76038	0,226	1,417	
CL-03-03	146	87238	0,200	1,578	
CL-03-06	145	89512	0,209	1,565	TEZONTLE/PÓMEZ
CL-03-07	149	83554	0,154	1,552	
CL-04-03	218	108293	0,263	1,629	
CL-04-04	222	109461	0,157	1,621	TEZONTLE/PÓMEZ
CL-04-05	223	107993	0,180	1,656	
CL-05-05	136	94959	0,211	1,729	
CL-05-06	134	97524	0,171	1,763	TEZONTLE/TEZONTLE
CL-05-07	142	81213	0,175	1,763	
CL-06-04	150	92751	0,054	1,749	
CL-06-05	153	87237	0,122	1,729	TEZONTLE/TEZONTLE
CL-06-06	145	95292	0,224	1,731	



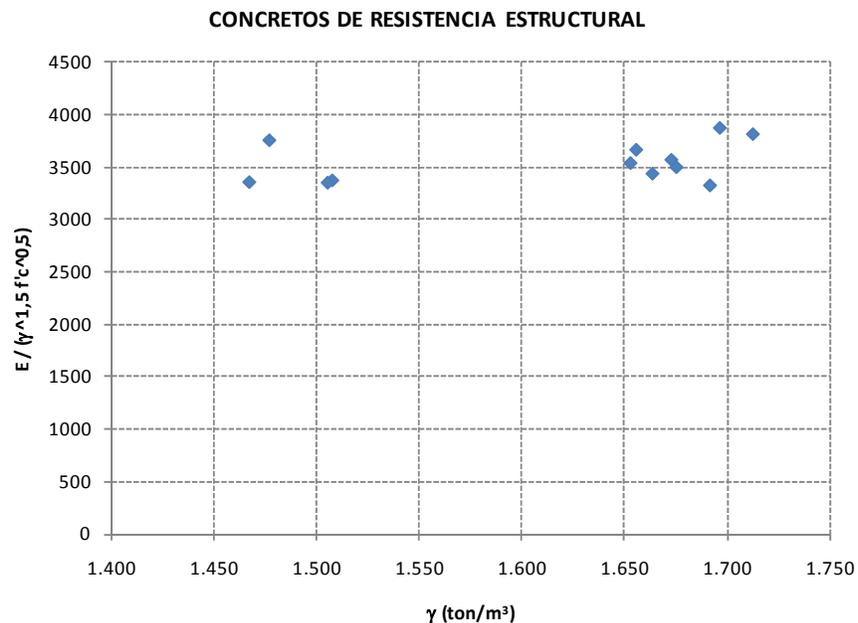
**GRAFICA 4.11. MASA VOLUMÉTRICA VS. CONSTANTE RELACIONADA AL MÓDULO DE ELASTICIDAD
CONCRETOS DE RESISTENCIA MEDIA**



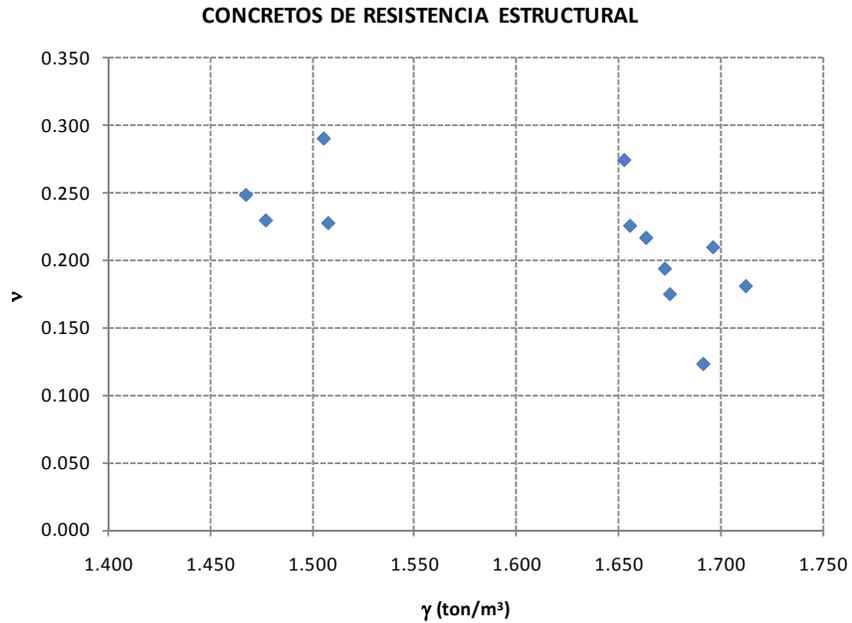
GRAFICA 4.12. MASA VOLUMÉTRICA VS. RALACIÓN DE POISSON CONCRETOS DE RESISTENCIA MEDIA

TABLA 4.9. MÓDULO DE ELASTICIDAD Y RELACIÓN DE POISSON (28 DÍAS) CONCRETOS DE RESISTENCIA ESTRUCTURAL

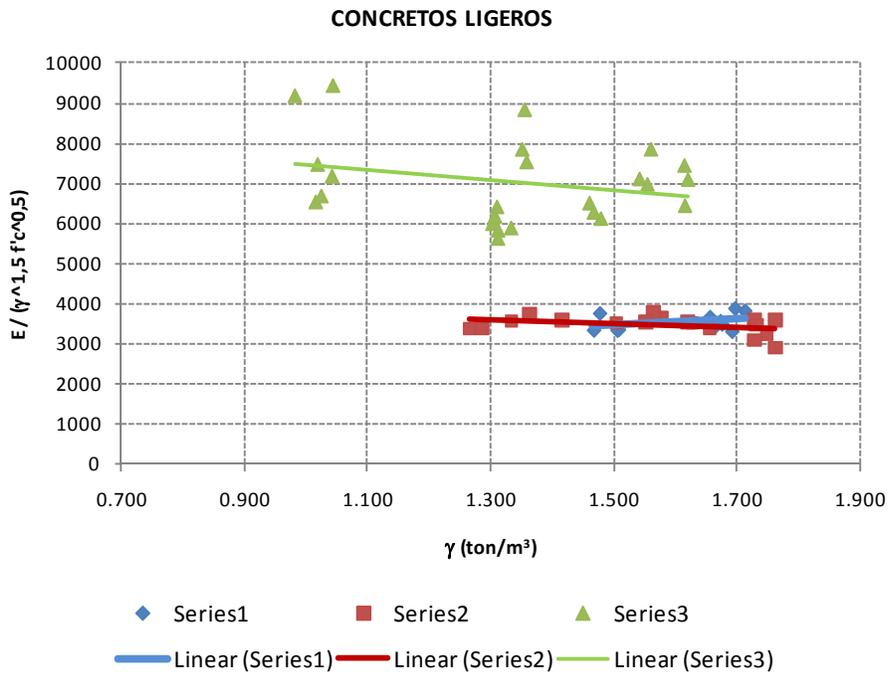
Espécimen	Resistencia a Compresión (kg/cm ²)	Módulo de Elasticidad (kg/cm ²)	Relación de Poisson	Masa Unitaria Concreto Endurecido (ton/m ³)	AGREGADO
XL-01-03	192	93525	0,230	1,477	PÓMEZ/PÓMEZ
XL-01-09	197	83644	0,249	1,467	
XL-02-07	227	93986	0,228	1,508	PÓMEZ/PÓMEZ
XL-02-09	223	92327	0,291	1,506	
XL-03-01	193	104455	0,275	1,653	TEZONTLE/PÓMEZ
XL-03-06	198	109962	0,226	1,656	
XL-04-02	223	110079	0,217	1,664	TEZONTLE/PÓMEZ
XL-04-07	225	113785	0,175	1,676	
XL-05-03	162	98315	0,194	1,673	TEZONTLE/TEZONTLE
XL-05-10	155	90973	0,123	1,692	
XL-06-07	209	123967	0,210	1,697	TEZONTLE/TEZONTLE
XL-06-08	207	123179	0,181	1,713	



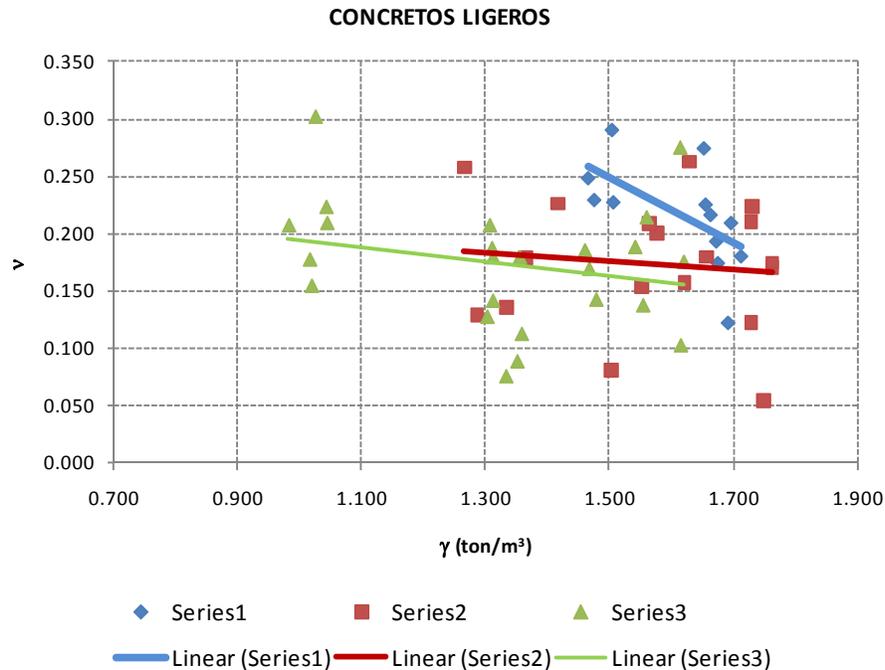
GRAFICA 4.13. MASA VOLUMÉTRICA VS. CONSTANTE RELACIONADA AL MÓDULO DE ELASTICIDAD CONCRETOS DE RESISTENCIA ESTRUCTURAL



GRAFICA 4.14. MASA VOLUMÉTRICA VS. RELACIÓN DE POISSON CONCRETOS DE RESISTENCIA ESTRUCTURAL



GRAFICA 4.15. MASA VOLUMÉTRICA VS. CONSTANTE RELACIONADA AL MÓDULO DE ELASTICIDAD CONCRETOS LIGEROS



GRAFICA 4.16. MASA VOLUMÉTRICA VS. RELACIÓN DE POISSON CONCRETOS LIGEROS

4.6. COMENTARIOS A LAS GRÁFICAS OBTENIDAS

La tabla 4.10 resume los comentarios que se realizan de las gráficas anteriores y se muestran a continuación:

TABLA 4.10 COMENTARIOS A LAS GRÁFICAS

Gráfica	Título	Comentario
4.1.	Masa volumétrica vs resistencia a compresión. Concretos de baja resistencia	Se identifican dos grupos dentro de la gráfica. El primero se le asocia una resistencia a compresión del orden de los 25 kg/cm ² , mientras que la resistencia del segundo es del orden de 70 kg/cm ² . El primer grupo está conformado por concretos con agregados de pómez. La baja resistencia obedece a la baja cantidad de cemento y al porcentaje de aire incorporado (20%). Para este tipo de concretos se utilizó un inductor de aire.
4.2.	Masa volumétrica vs resistencia a compresión. Concretos de resistencia media	La resistencia a compresión de este tipo de concreto osciló los 150 kg/cm ² . Se logró este valor de resistencia retirando el inductor de aire. Se observa una tendencia casi constante sin importar el tipo de agregado usado.

TABLA 4.10 COMENTARIOS A LAS GRÁFICAS

Gráfica	Título	Comentario
4.3.	Masa volumétrica vs resistencia a compresión. Concretos de resistencia estructural	En este tipo de concreto se observa una tendencia constante similar a los de resistencia media, sólo que el valor de la resistencia aumentó a 200 kg/cm ² . Esta resistencia se obtuvo disminuyendo la relación agua-cemento en la mezcla.
4.4.	Masa volumétrica vs resistencia a compresión. Concretos ligeros	Se identifican claramente los tres grupos estudiados con sus respectivas tendencias.
4.5.	Masa volumétrica vs relación resistencia a tensión y compresión. Concretos de baja resistencia	El valor de esta relación para el concreto de masa normal se ubica entre el 8% y 12%. Para este tipo de concreto este valor se acercó a 13% aunque cabe señalar que hubo una gran dispersión entre los resultados, los porcentajes más bajos corresponden a la mezcla con agregados tezontle/pómez.
4.6.	Masa volumétrica vs relación resistencia a tensión y compresión. Concretos de resistencia media	Los valores de esta relación para este tipo de concreto se acercaron mucho a los valores asociados al concreto de masa normal (8%-12%).
4.7.	Masa volumétrica vs relación resistencia a tensión y compresión. Concretos de resistencia estructural	Los valores de esta relación para este tipo de concreto se acercaron mucho a los valores asociados al concreto de masa normal (9%-13%).
4.8.	Masa volumétrica vs relación resistencia a tensión y compresión. Concretos ligeros	No parece haber muchos cambios en esta relación entre los concretos estudiados y el concreto de masa normal.
4.9.	Masa volumétrica vs constante relacionada al módulo de elasticidad. Concretos de baja resistencia	El valor de la constante que relaciona al módulo de elasticidad con la masa volumétrica y la resistencia a compresión de concreto de masa normal es cercano a 3700, para una masa volumétrica comprendida entre 1,5 ton/m ³ y 2,5 ton/m ³ . Para este tipo de concreto este valor de la constante se ubica cerca de 7000, cabe señalar que la mayoría de los especímenes no entran en el rango especificado de masa volumétrica (0,9-1,6 ton/m ³), además que el valor definido para la constante en el caso de concreto normal está especificado para concretos de resistencia estructural. Para obtener el valor de la constante aquí descrita la masa volumétrica debe tener las unidades de ton/m ³ .

TABLA 4.10 COMENTARIOS A LAS GRÁFICAS

Gráfica	Título	Comentario
4.10.	Masa volumétrica vs relación de Poisson. Concretos de baja resistencia	Para el concreto de masa normal a la relación de Poisson se le asocia un valor de 0,2. En este tipo de concreto la tendencia arrojó un valor de 0,17.
4.11.	Masa volumétrica vs constante relacionada al módulo de elasticidad. Concretos de resistencia media	Para este tipo de concreto el valor de esta constante fue del orden de 3500 el cual se acerca mucho al valor empleado para concreto de masa normal. El rango de masa volumétrica fue de 1,2 a 1,8 ton/m ³ .
4.12.	Masa volumétrica vs relación de Poisson. Concretos de resistencia media	En este tipo de concreto la tendencia arrojó un valor de 0,17 similar al concreto de baja resistencia.
4.13.	Masa volumétrica vs constante relacionada al módulo de elasticidad. Concretos de resistencia estructural	Para este tipo de concreto el valor de esta constante fue del orden de 3500 el cual se acerca mucho al valor empleado para concreto de masa normal. El rango de masa volumétrica fue de 1,4 a 1,8 ton/m ³ .
4.14.	Masa volumétrica vs relación de Poisson. Concretos de resistencia estructural	En este tipo de concreto la tendencia arrojó un valor de 0,22 que es mayor al del concreto de masa normal.
4.15.	Masa volumétrica vs constante relacionada al módulo de elasticidad. Concretos ligeros	En los concretos estudiados que se pueden usar con fines estructurales el valor de la constante se acerca mucho al valor empleado en el concreto de masa normal, lo cual sugiere que se podría emplear la misma expresión haciendo un ajuste para poder pronosticar el módulo de elasticidad.
4.16.	Masa volumétrica vs relación de Poisson. Concretos ligeros	Los valores reportados se asemejan mucho al concreto de masa normal. Cabe señalar que existe una gran dispersión en los valores reportados.

BIBLIOGRAFÍA:

- **American Concrete Institute (1998).** “ACI 211.2-98 Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete”.
- <http://www.imcyc.com.mx/cyt/febrero03/autocompactable.htm>
- **American Society of Test Material (2002).** “ASTM C 469-02. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression”.
- **American Society of Test Material (1996).** “ASTM C 496-96. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens”.

- **American Society of Test Material (2001)**. “ASTM C 39/C 39M-01. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens”.
- **Industria de la Construcción (2004)**. “NMX-C-073-ONNCCE-2004 Industria de la Construcción – Agregados – Masa Volumétrica – Método de Prueba”.
- **Industria de la Construcción (2002)**. “NMX-C-083-ONNCCE-2002 Industria de la Construcción – Concreto – Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cilindros de Concreto – Método de Prueba”.
- **Industria de la Construcción (2004)**. “NMX-C-109-ONNCCE-2004 Industria de la Construcción – Concreto-Cabeceo de Especímenes Cilíndricos”.
- **Industria de la Construcción (1997)**. “NMX-C-128-ONNCCE-1997 Industria de la Construcción – Concreto Sometido a Compresión – Determinación del Módulo de Elasticidad Estático y Relación de Poisson”.
- **Industria de la Construcción (1997)**. “NMX-C-163-ONNCCE-1997 Industria de la Construcción – Concreto – Determinación de la Resistencia a la Tensión por Compresión Diametral en Cilindros de Concreto”.
- **Industria de la Construcción (2002)**. “NMX-C-148-ONNCCE-2002 Industria de la Construcción – Cementos Hidráulicos – Gabinetes y Cuartos Húmedos y Tanques de Almacenamiento para Curado de Especímenes de Mortero y Concreto de Cementantes Hidráulicos”.
- **Industria de la Construcción (2004)**. “NMX-C-155-ONNCCE-2004 Industria de la Construcción – Concreto – Concreto Hidráulico Industrializado - Especificaciones”.
- **Industria de la Construcción (1997)**. “NMX-C-156-ONNCCE-1997 Industria de la Construcción – Concreto – Determinación del Revenimiento en el Concreto Fresco”.
- **Industria de la Construcción (2004)**. “NMX-C-159-ONNCCE-2004 Industria de la Construcción – Concreto – Elaboración y Curado de Especímenes en el Laboratorio”.
- **Industria de la Construcción (1997)**. “NMX-C-161-ONNCCE-1997 Industria de la Construcción – Concreto Fresco – Muestreo”.
- **Industria de la Construcción (2002)**. “NMX-C-164-ONNCCE-2002 Industria de la Construcción – Agregados – Determinación de la Masa Específica y Absorción de Agua del Agregado Grueso”.
- **Industria de la Construcción (2004)**. “NMX-C-165-ONNCCE-2004 Industria de la Construcción – Agregados – Determinación de la Masa Específica y Absorción de Agua del Agregado Fino”.
- **Industria de la Construcción (1999)**. “NMX-C-403-ONNCCE-1999 Industria de la Construcción – Concreto Hidráulico para Uso Estructural”.

5. EJEMPLO DE APLICACIÓN A UN EDIFICIO

El proyecto consiste en un edificio de concreto reforzado de 4 niveles destinado a hospital. Se eligió este tipo de estructura debido a que es considerada del grupo A (por su importancia) y se pueden observar de manera más clara los efectos sísmicos que se tienen que considerar. Por el mismo motivo, se consideró que se encuentra desplantada sobre suelo blando.

El objetivo es comparar las ventajas y desventajas que existe al emplear concreto ligero en un edificio. Observaremos el comportamiento de las fuerzas gravitacionales, fuerzas sísmicas y el diseño estructural de elementos.

Por último, se realiza una comparativa en cuanto a costos para este edificio en particular.

5.1. GEOMETRÍA DE LA ESTRUCTURA

Las siguientes figuras muestran la geometría y aspectos generales de la estructura.

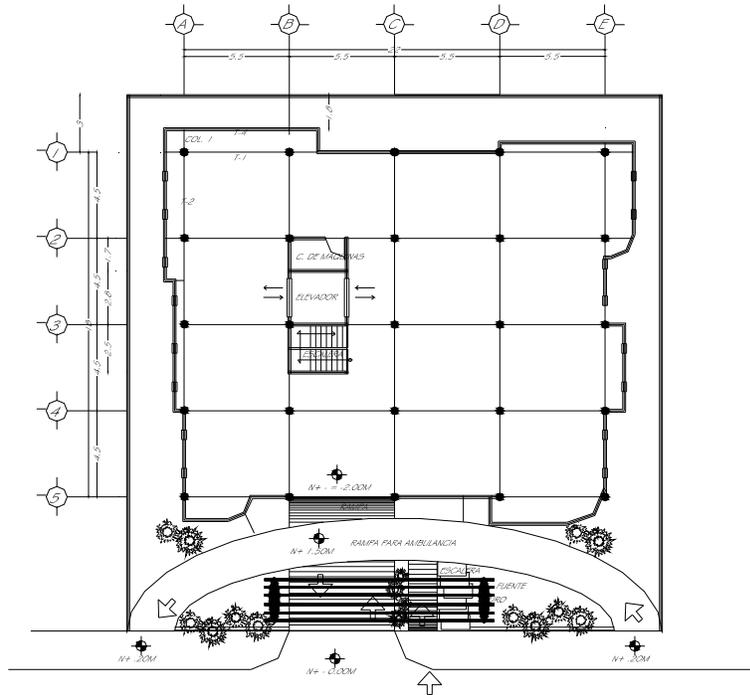


FIGURA 5.1 PLANTA BAJA ESTACIONAMIENTO N-2,00 m

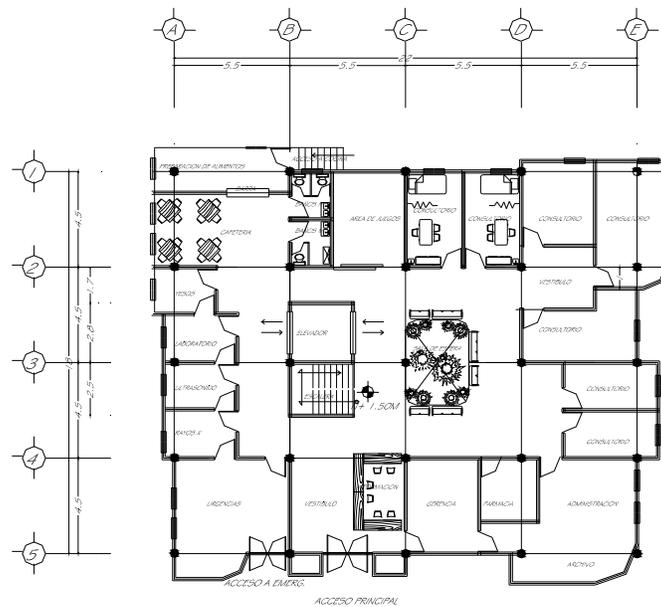


FIGURA 5.2 PLANTA NIVEL 1 N+1,50 m

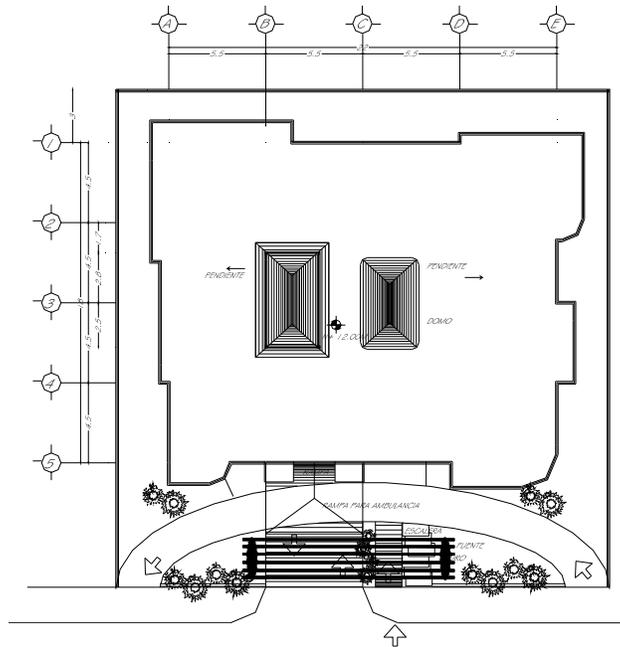


FIGURA 5.5 PLANTA AZOTEA N+12,00 m

El proyecto consiste en un edificio de concreto reforzado de 4 niveles destinado a hospital. El sistema de piso es por medio de losas macizas soportadas por traveses y columnas que se apoya sobre una losa de cimentación con contratraveses invertidas.

5.2. CALIDAD DE LOS MATERIALES

Las calidades de los materiales empleados para la conformación de cada uno de los elementos estructurales se definen en la siguiente tabla.

TABLA 5.1 CALIDAD DE LOS MATERIALES

Material	γ (ton/m ³)	$f'c$ (kg/cm ²)	E_c (kg/cm ²)	f_y (kg/cm ²)	E_y (kg/cm ²)
Concreto peso normal	2,40	250	221359	4200	2039000
Concreto Ligero	1,65	250	111900	4200	2039000

5.3. CARGAS CONSIDERADAS

Se consideraron las siguientes acciones.

Peso Propio (PP)

El peso propio de los elementos es tomado en cuenta directamente en el programa de análisis estructural.

Carga Viva (CV)

Las cargas vivas consideradas en el proyecto se tabulan a continuación:

TABLA 5.2 CARGA VIVA (kg/m²)

ÁREA	C. GRAVITACIONAL	C. SISMO
PB Estacionamiento	250	100
Nivel 1 al 3 Hospital	170	90
Azotea pendiente menor a 5%	100	70

Carga Muerta (CM)

Las cargas muertas consideradas se pueden observar en las siguientes tablas:

TABLA 5.3 Cargas muertas consideradas PB (kg/m²)

Losa maciza 20 cm	480
Instalaciones	20
Sobrecarga RCDF	40
TOTAL	540

TABLA 5.4 Cargas muertas consideradas NIVEL 1 al 3 (kg/m²)

Losa maciza 12 cm	290
Acabado de piso	100
Instalaciones	20
Sobrecarga RCDF	40
TOTAL	450

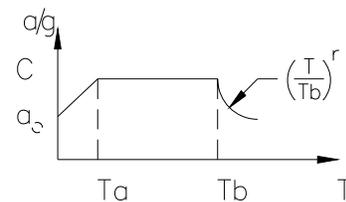
TABLA 5.5 Cargas muertas consideradas AZOTEA (kg/m²)

Losa maciza 12 cm	290
Relleno y entortado	130
Instalaciones e impermeabilizante	20
Sobrecarga RCDF	40
TOTAL	450

Carga Accidental de Sismo (Sx y Sy)

Los parámetros para el diseño sísmico fueron tomados del Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad.

Zona sísmica	B
Tipo de suelo	III
Grupo	A
Coficiente sísmico	C=0,36
Factor por irregularidad	f=0,9
Parámetros	a _o =0,10 T _a =0,60 s T _b =2,90 s r=1,00



De acuerdo con el apartado 3.4.3 del Manual de Diseño de Obras Civiles por Sismo de CFE la estructura se definió como irregular adoptando un factor de 0,9. De acuerdo con el inciso 3.2.4 del mismo manual el factor de comportamiento para ambas direcciones se definió en $Q=2,0$. Para la determinación de las fuerzas sísmicas se realizó un análisis dinámico tridimensional modal espectral combinando las acciones por medio de la suma cuadrática completa (CQC).

5.4. COMBINACIONES DE CARGA

Se consideraron 6 condiciones independientes de carga (4 de ellas estáticas y 2 dinámicas) y 13 combinaciones de carga.

Las 4 condiciones de carga estáticas utilizadas son:

PP: Peso propio de elementos estructurales
 CM: Carga muerta.
 CVMAX: Carga viva máxima
 CVACC: Carga viva accidental

En el caso del análisis dinámico se consideraron 2 condiciones de carga:

Sx: Sismo en dirección X
 Sy: Sismo en dirección Y

Las combinaciones de diseño consideradas fueron las definidas en la siguiente tabla de multiplicadores de carga:

TABLA 5.6 COMBINACIONES DE CARGA

# DE COMB	PP	CM	CV MAX	CV ACC	Sx	Sy	COMENTARIOS
1	1,5	1,5	1,5				GRAVITACIONAL
2	1,1	1,1		1,1	1,1		
3	1,1	1,1		1,1	1,1	0,33	
4	1,1	1,1		1,1	1,1	-0,33	SISMO EN X
5	1,1	1,1		1,1	-1,1	0,33	
6	1,1	1,1		1,1	-1,1	-0,33	
7	0,9	0,9		0,9	1,1		
8	1,1	1,1		1,1		1,1	
9	1,1	1,1		1,1	0,33	1,1	
10	1,1	1,1		1,1	-0,33	1,1	SISMO EN Y
11	1,1	1,1		1,1	0,33	-1,1	
12	1,1	1,1		1,1	-0,33	-1,1	
13	0,9	0,9		0,9		1,1	

5.5. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Para el análisis estructural se utilizó un modelo tridimensional del inmueble, en el cual se incluyeron todos los elementos principales de la estructura, así como la losa que conforma la cimentación simulando el efecto del suelo por medio de resortes cuyas propiedades geométricas y módulo de elasticidad se define a partir del módulo de reacción del suelo. En las siguientes figuras se muestra el modelo estructural utilizado en el análisis.

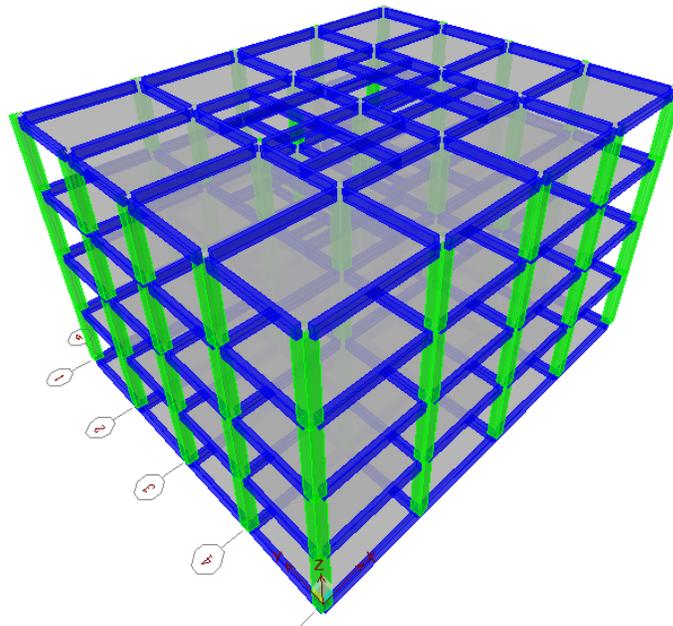
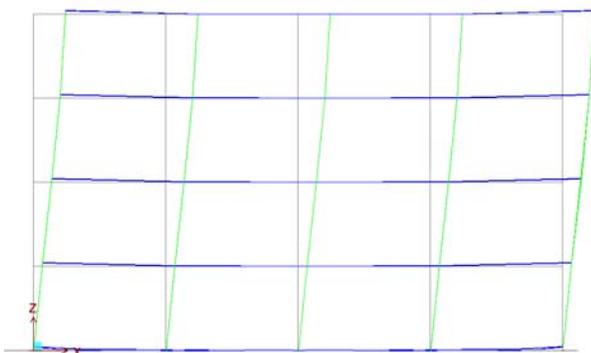


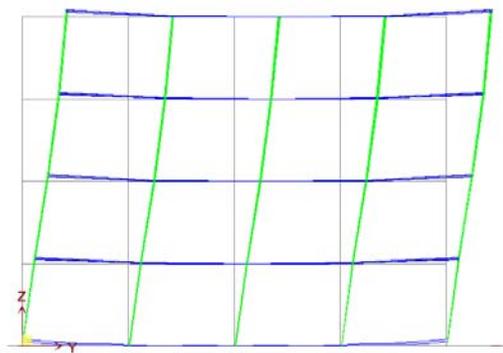
FIGURA 5.6 MODELO ESTRUCTURAL (ISOMÉTRICO)

Análisis Dinámico

El análisis dinámico de la estructura se realizó mediante el método modal espectral tridimensional por vectores de Ritz.



DEFORMADA POR SISMO EN DIRECCIÓN X



DEFORMADA POR SISMO EN DIRECCIÓN Y

FIGURA 5.7

Masa y peso de la estructura

A continuación se muestra la masa dinámica total, así como el peso de la estructura para la combinación que incluye el sismo.

TABLA 5.7 COMPARACIÓN DE MASA Y PESO DE LAS ESTRUCTURAS ANALIZADAS

Descripción	Concreto de peso normal	Concreto Ligero	Comparación
Peso propio (ton)	1235,0	788,0	63,8%
Masa total sísmica (ton s ² /m)	137,4	101,3	73,7%
Peso total sísmico (ton)	1348,0	994,0	

En la tabla 5.7 se puede observar cómo se reduce el peso propio de la estructura a un 64%, lo que impacta en la masa sísmica total y se reduce a un 74%. Esto ocurre debido a que la masa considerada que se acelera es la correspondiente a las condiciones de peso propio, carga muerta adicional y carga viva accidental y no únicamente al peso propio. Es por ello que aunque el peso disminuye 64%, el impacto que se tiene en la masa sísmica total es de 74% ya que influyen también la carga muerta adicional y carga viva accidental que permanecen constantes en ambos casos.

Periodos y masas modales

En las siguientes tablas se presentan las propiedades dinámicas de la estructura analizada:

TABLA 5.8 PROPIEDADES DINÁMICAS ESTRUCTURA CONCRETO PESO NORMAL

Modo	T (s)	f (Hz)	w (rad/s)	PP X	Suma PP X	PP Y	Suma PP Y
1	0,68	1,48	9,27	68,82	68,82	0,00	0,00
2	0,66	1,52	9,55	0,00	68,82	68,94	68,94
3	0,55	1,81	11,36	0,00	68,82	0,03	68,97
4	0,20	4,99	31,33	8,42	77,24	0,00	68,97
5	0,19	5,17	32,46	0,00	77,24	8,50	77,47
6	0,14	7,35	46,19	0,00	77,24	0,07	77,53
7	0,11	9,09	57,10	2,78	80,03	0,00	77,53
8	0,11	9,50	59,68	0,00	80,03	2,95	80,48
9	0,07	13,34	83,80	0,91	80,94	0,00	80,48
10	0,04	24,02	150,95	0,00	80,94	19,05	99,53
11	0,04	24,78	155,67	19,06	100,00	0,00	99,53
12	0,02	58,90	370,08	0,00	100,00	0,00	99,53

TABLA 5.9 PROPIEDADES DINÁMICAS ESTRUCTURA CONCRETO LIGERO

Modo	T (s)	f (Hz)	w (rad/s)	PP X	Suma PP X	PP Y	Suma PP Y
1	0,82	1,22	7,67	70,27	70,27	0,00	0,00
2	0,79	1,26	7,93	0,00	70,27	70,45	70,45
3	0,67	1,50	9,39	0,00	70,27	0,03	70,48
4	0,24	4,10	25,78	8,26	78,53	0,00	70,48
5	0,24	4,25	26,73	0,00	78,53	8,24	78,73
6	0,16	6,08	38,18	0,00	78,53	0,06	78,79
7	0,13	7,51	47,19	2,52	81,05	0,00	78,79
8	0,13	7,85	49,32	0,00	81,05	2,61	81,41
9	0,09	11,03	69,33	0,67	81,72	0,00	81,41
10	0,04	27,51	172,82	0,00	81,72	16,47	97,88
11	0,03	30,22	189,85	18,25	99,97	0,00	97,88
12	0,02	49,72	312,43	0,03	100,00	0,00	97,88

donde:

T - Periodo

f - Frecuencia

w - Frecuencia angular

PP - Porcentaje de participación modal

Debido al módulo de elasticidad menor en la estructura de concreto ligero, se observa en las tablas 5.8 y 5.9 que la estructura se vuelve un más flexible debido a que los periodos relacionados a la estructura aumentan, como era de esperarse. Para la estructura de concreto de peso normal se tiene un periodo fundamental en dirección "X" de 0,68 segundos y en dirección "Y" de 0,66 segundos, ambos con una participación modal del 69%; mientras que para la estructura de concreto ligero se tiene un periodo fundamental de 0,82 segundos y 0,79 segundos para la dirección "X" y "Y" respectivamente, ambos con una participación modal del 70%. Por la misma razón, se observa posteriormente en las tablas 5.10 y 5.11 que los desplazamientos aumentan en forma considerable aunque se mantienen en los rangos permisibles.

Era supuesto que los periodos se vieran afectados proporcionalmente con el módulo de elasticidad, ya que este último es proporcional al estimar la rigidez lateral de la estructura. Es decir, si la diferencia entre los módulos de elasticidad era del 50% los periodos tendrían que tener esta misma diferencia. Sin embargo, esto no fue así, debido a que los elementos estructurales en el caso de edificio de concreto ligero tuvieron que ser mayores en dimensiones para poder cumplir con los desplazamientos permisibles.

Distorsiones de entrepiso

En las tablas siguientes (tabla 5.10 y 5.11) se muestran las distorsiones de entrepiso para cada caso analizado:

TABLA 5.10 DISTORSIONES DE ENTREPISO ESTRUCTURA CONCRETO PESO NORMAL

NIVEL	Máxima distorsión en X	Máxima distorsión en Y
Azotea	0,0038	0,0037
Nivel 3	0,0061	0,0058
Nivel 2	0,0077	0,0073
Nivel 1	0,0073	0,0070

TABLA 5.11 DISTORSIONES DE ENTREPISO ESTRUCTURA CONCRETO LIGERO

NIVEL	Máxima distorsión en X	Máxima distorsión en Y
Azotea	0,0055	0,0053
Nivel 3	0,0090	0,0085
Nivel 2	0,0113	0,0107
Nivel 1	0,0106	0,0102

Cortante basal

El cortante basal se observa en la siguiente tabla:

TABLA 5.12 COMPARACIÓN DEL CORTANTE BASAL EN AMBAS DIRECCIONES PARA LAS ESTRUCTURAS ANALIZADAS

Dirección	Concreto de peso normal	Concreto Ligero	Comparación
X	340,5	261,9	76,9%
Y	339,8	262,2	77,2%

El cortante basal es de los parámetros más importantes para estructuras desplantadas en regiones de alta sismicidad, ya que el diseño de sus elementos queda regido por esta acción y no por las correspondientes a gravitacionales.

Para los casos en estudio hubo una reducción al 77% aproximadamente en ambas direcciones para la estructura de concreto ligero, esto se debe principalmente a la variación en la masa de la estructura, aunque no es el único parámetro que involucra el análisis dinámico que se realizó.

5.6. DISEÑO DE ELEMENTOS

A continuación se presenta el diseño de algunos elementos que forman parte de la estructura, el apéndice C contiene mayor información al respecto.

Losa de cimentación

Para el diseño de la losa de cimentación se realizó con ayuda de los elementos mecánicos reportados en el análisis y la cantidad de acero se determinó con el estudio de una viga simplemente armada de un ancho unitario, esto debido a que el programa reporta así los resultados. La revisión del acero de refuerzo y del espesor de la losa se muestra en la siguiente tabla:

TABLA 5.13 REVISIÓN DE LA LOSA DE CIMENTACIÓN

M_U (ton.m)	A_s	M_R (ton.m)	M_U/M_R	Estado
3,85	#4@20	3,88	0,99	Adecuado
3,50	#4@20	3,88	0,90	Adecuado

Para calcular el momento resistente se obtiene de la siguiente forma:

$$M_R = F_R b d^2 f_c'' q (1 - 0,5q)$$

donde:

$q = \frac{p f_y}{f_c''}$	b	ancho de la sección
	d	peralte efectivo
$p = \frac{A_s}{bd}$	f_c''	esfuerzo uniforme de compresión
	A_s	área del refuerzo de tensión

Hasta este punto las ecuaciones siguen siendo válidas para ambos tipos de concreto ya que en flexión se considera que el concreto no aporta resistencia a tensión.

Para calcular el cortante resistente elementos de concreto de masa normal se emplea la siguiente ecuación para elementos anchos:

$$V_{CR} = 0,5 F_R b d \sqrt{f_c^*}$$

donde:

f_c^* resistencia nominal del concreto a compresión

En el caso de concretos ligeros la expresión es la siguiente:

$$V_{CR} = 0,5 F_R b d (0,57 f_{ct})$$

donde:

f_{ct}	Resistencia promedio al agrietamiento por tensión del concreto ligero	$0,57 f_{ct}$	No debe ser mayor a $\sqrt{f_c^*}$, el 0,57 se sustituye por $1,8 f_{ct}$ en unidades del sistema internacional
----------	---	---------------	--

El las figuras 5.8 y 5.9 se muestran los diagramas de momento en ambas direcciones de la losa, mientras que en las figuras 5.10 y 5.11 se muestran los diagramas de fuerza cortante en ambas direcciones también.

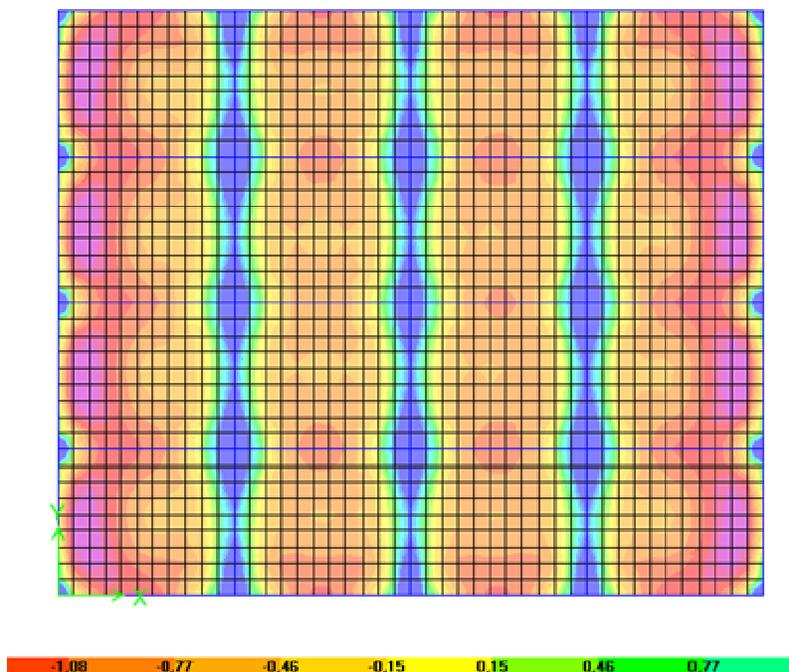


FIGURA 5.8 MOMENTO M11 LOSA DE CIMENTACIÓN

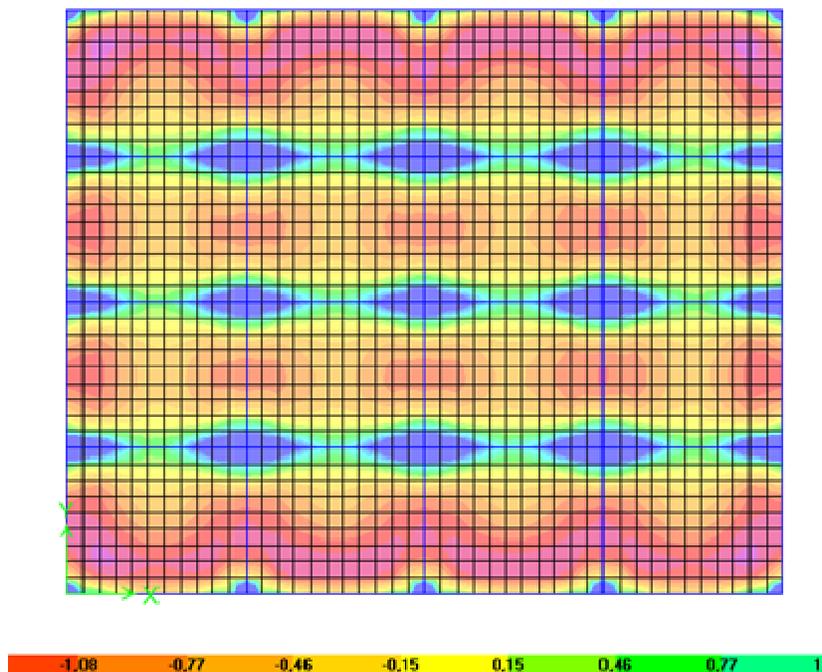


FIGURA 5.9 MOMENTO M22 LOSA DE CIMENTACIÓN

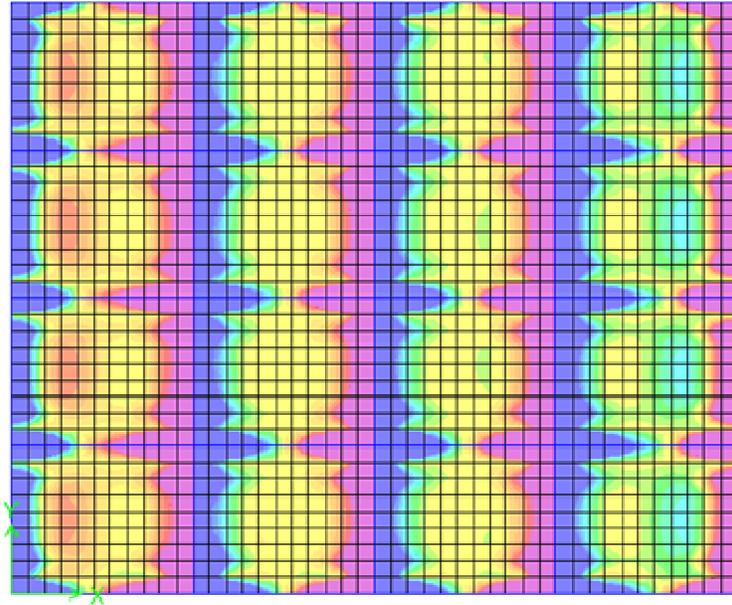


FIGURA 5.10 CORTANTE V13 LOSA DE CIMENTACIÓN

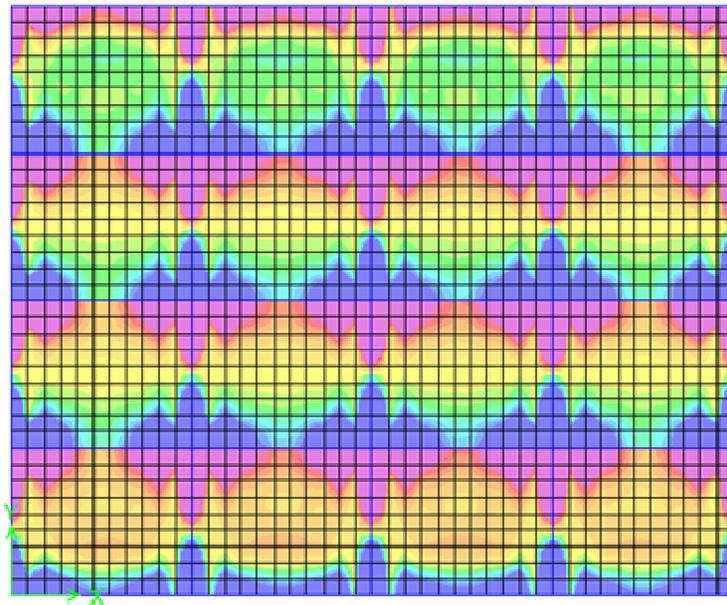


FIGURA 5.11 CORTANTE V23 LOSA DE CIMENTACIÓN

Columnas

El diseño de columnas queda regido por los elementos mecánicos del análisis estructural y por su diagrama de interacción.

Para calcular la resistencia de la columna se emplean las siguientes ecuaciones:

$$P_R = \frac{1}{\frac{1}{P_{Rx}} + \frac{1}{P_{Ry}} - \frac{1}{P_{R0}}} \quad \text{para } \frac{P_R}{P_{R0}} \geq 0,10$$

donde:

P_R carga normal resistente de diseño, aplicada con las excentricidades e_x y e_y

P_{Rx} carga normal resistente de diseño, aplicada con una excentricidad e_x

P_{R0} carga axial resistente de diseño, suponiendo $e_x = e_y = 0$

P_{Ry} carga normal resistente de diseño, aplicada con una excentricidad e_y en el otro plano de simetría

$$\frac{M_{Ux}}{M_{Rx}} + \frac{M_{Uy}}{M_{Ry}} \leq 1,0 \quad \text{para } \frac{P_R}{P_{R0}} \leq 0,10$$

donde:

M_{Ux} y M_{Uy} momentos de diseño alrededor de los ejes X y Y

M_{Rx} y M_{Ry} Momentos resistentes de diseño alrededor de los mismos ejes

No se empleo ninguna distinción entre el diseño de columnas para ambos casos en estudio.

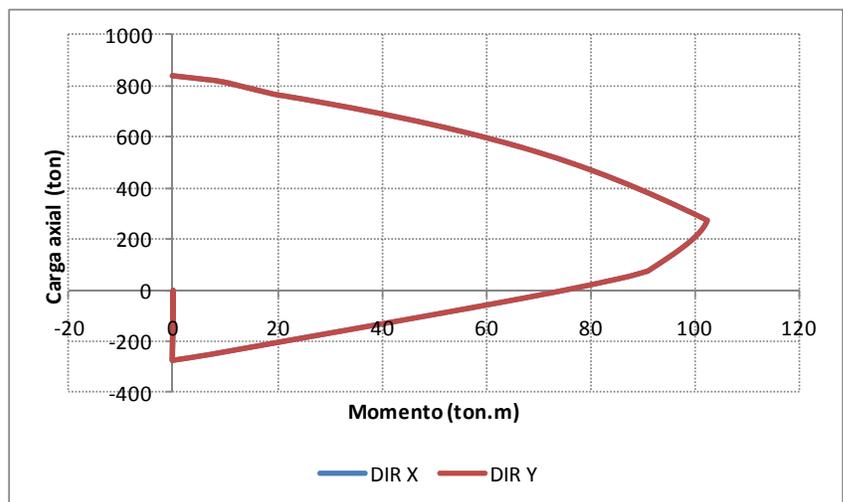
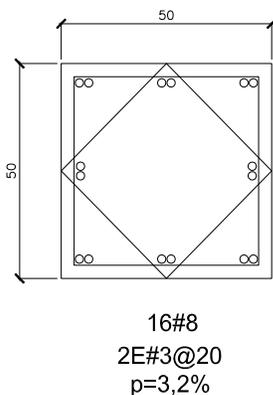


FIGURA 5.12 DIAGRAMA DE INTERACCIÓN COLUMNA INDICADA

RESUMEN DE DATOS:

LA BASE ES:	50,000	cm
LA ALTURA ES:	50,000	cm
EL RECUB. ES:	5,000	cm
EL f_c ES:	250,000	kg/cm ²
EL f_y ES:	4200,000	kg/cm ²
EL Pu ES:	84,000	ton
EL Mux ES:	13,300	ton*m
EL Muy ES:	44,000	ton*m
LA ex ES:	0,524	m
LA ey ES:	0,158	m

RESUMEN DE RESULTADOS:

PR0 (ton)	PRx (ton)	MRx (ton*m)	PRy (ton)	MRy (ton*m)
601,531	303,531	47,927	115,878	60,852

$$PR = 1 / (1/Prx + 1/Pr0) = 97,448 \text{ ton}$$

$$PR/PR0 = 0,162$$

$$Mux/Mrx + Muy/Mry = 1,001$$

Por lo tanto la columna es adecuada

Trabes.

El cálculo de las trabes es prácticamente el mismo que en las losas con la diferencia del cálculo del cortante resistente.

$$V_R = V_{CR} + V_{SR}$$

donde:

V_{CR} fuerza cortante que toma el concreto V_{SR} fuerza cortante que toma el acero

En el caso de concreto de masa normal:

$$V_{CR} = F_R b d (0,2 + 20p) \sqrt{f_c^*} \quad \text{para } p < 0,015$$

$$V_{CR} = 0,5 F_R b d \sqrt{f_c^*} \quad \text{para } p \geq 0,015$$

Para concreto ligero:

$$V_{CR} = F_R b d (0,2 + 20p) (0,57 f_{ct}) \quad \text{para } p < 0,015$$

$$V_{CR} = 0,5 F_R b d (0,57 f_{ct}) \quad \text{para } p \geq 0,015$$

donde:

p cuantía a tensión
 f_{ct} Resistencia promedio al agrietamiento por tensión del concreto ligero $0,57 f_{ct}$ No debe ser mayor a $\sqrt{f_c^*}$

$$V_{SR} = \frac{F_R A_v f_y d (\sin \theta + \cos \theta)}{s}$$

donde:

A_v área transversal del refuerzo por tensión diagonal comprendido en una distancia s θ ángulo que dicho refuerzo forma con el eje de la pieza

5.7. CUANTIFICACIÓN

A continuación se presenta la cuantificación del acero de refuerzo y concreto de ambas estructuras analizadas con el fin de establecer una comparación entre ellas.

TABLA 5.14 CUANTIFICACIÓN DE ACERO DE REFUERZO ESTRUCTURA CONCRETO PESO NORMAL

PLANTA	ELEMENTO	CANTIDAD DE ACERO (kg)
Cimentación	Contratrabe CT-1	3 025,98
Cimentación	Contratrabe CT-2	2 460,16
Cimentación	Losa de cimentación	5 944,12
Nivel 1-2	Columna C-1	10 826,26
Nivel 1-2	Columna C-2	1 617,17
Nivel 3-4	Columna C-3	7 326,20
Nivel 1-2	Trabe T-1	5 910,62
Nivel 1-2	Trabe T-2	4 864,00
Nivel 3-4	Trabe T-1	4 585,60
Nivel 3-4	Trabe T-2	3 771,20
Nivel 1-2-3-4	Losa de entrepiso	14 903,47
TOTAL		65 234,77

TABLA 5.15 CUANTIFICACIÓN DE ACERO DE REFUERZO ESTRUCTURA CONCRETO LIGERO

PLANTA	ELEMENTO	CANTIDAD DE ACERO (kg)
Cimentación	Contratrabe CT-1	2 654,31
Cimentación	Contratrabe CT-2	2 224,37
Cimentación	Losa de cimentación	3 348,80
Nivel 1-2	Columna C-1	7 468,19
Nivel 1-2	Columna C-2	1 172,19
Nivel 3-4	Columna C-3	6 109,60
Nivel 1-2	Trabe T-1	5 006,22
Nivel 1-2	Trabe T-2	4 247,14
Nivel 3-4	Trabe T-1	4 196,74
Nivel 3-4	Trabe T-2	3 452,98
Nivel 1-2-3-4	Losa de entrepiso	1 3395,20
TOTAL		53 275,73

Se puede observar una reducción en la cantidad de acero de refuerzo al 81,7%, esto se debe principalmente a que el diseño de la mayoría de los elementos estructurales está regido por el caso sísmico y como se observó anteriormente las fuerzas sísmicas disminuyeron debido a que las masas que se aceleran se reducen significativamente.

TABLA 5.16 CUANTIFICACIÓN DE CONCRETO ESTRUCTURA CONCRETO PESO NORMAL

PLANTA	ELEMENTO	VOLUMEN DE CONCRETO (m³)
Cimentación	Contratrabe CT-1	20,79
Cimentación	Contratrabe CT-2	17,01
Cimentación	Losa de cimentación	85,54
Nivel 1-2	Columna C-1	39,69
Nivel 1-2	Columna C-2	7,56
Nivel 3-4	Columna C-3	47,25
Nivel 1-2	Trabe T-1	28,51
Nivel 1-2	Trabe T-2	23,33
Nivel 3-4	Trabe T-1	28,51
Nivel 3-4	Trabe T-2	23,33
Nivel 1-2-3-4	Losa de entrepiso	205,29
TOTAL		526,80

TABLA 5.17 CUANTIFICACIÓN DE CONCRETO ESTRUCTURA CONCRETO LIGERO

PLANTA	ELEMENTO	VOLUMEN DE CONCRETO (m³)
Cimentación	Contratrabe CT-1	17,82
Cimentación	Contratrabe CT-2	17,01
Cimentación	Losa de cimentación	64,15
Nivel 1-2	Columna C-1	39,69
Nivel 1-2	Columna C-2	7,56
Nivel 3-4	Columna C-3	47,25
Nivel 1-2	Trabe T-1	28,51
Nivel 1-2	Trabe T-2	23,33
Nivel 3-4	Trabe T-1	28,51
Nivel 3-4	Trabe T-2	23,33
Nivel 1-2-3-4	Losa de entrepiso	171,07
TOTAL		468,23

La reducción en el concreto fue al 88,9%. Esta reducción es menor que la del acero ya que en el diseño de la estructura de concreto ligero las dimensiones de los elementos quedaron regidas por las condiciones de servicio de la estructura, esto era de esperarse ya que el módulo de elasticidad era menor y por tanto los desplazamientos fueron mayores a pesar de que las fuerzas sísmicas se redujeron.

5.8. COSTOS DE PRODUCCIÓN

Los precios unitarios del concreto de peso normal y del concreto ligero se encuentran en las tablas 5.18 y 5.19, respectivamente.

TABLA 5.18 PRECIO UNITARIO CONCRETO PESO NORMAL

CONCEPTO				
CONCRETO HECHO EN OBRA F'C=250 kg/cm ² , RESISTENCIA NORMAL, T.M.A. 20 mm AGREGADOS ANDESITICOS				
Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Total
MATERIALES				
CEMENTO NORMAL CPC 30	TON	0,377	\$ 1.900,00	\$ 716,30
ARENA DE MINA	m ³	0,561	\$ 150,00	\$ 84,15
GRAVA ANDESITICA 20 mm TMA	m ³	0,880	\$ 200,00	\$ 176,00
AGUA DE TOMA MUNICIPAL	m ³	0,205	\$ 60,00	\$ 12,30
			Total de Materiales	\$ 988,75
MANO DE OBRA				
CUADRILLA No 103 (1 OPERADOR DE REVOLVEDORA MAS 7 PEONES	JOR	0,0666	\$ 2.728,66	\$ 181,73
			Total de Mano de Obra	\$ 181,73
EQUIPO				
REVOLVEDORA PARA CONCRETO MPSA-KOHLER R-10 8 H.P. 1 SACO	Hora	0,5333	\$ 26,49	\$ 14,13
			Total de Equipo	\$ 14,13
Costo Directo	\$ 1.184,61	Unidad :		m ³
Indirectos y utilidad (19.00%)	\$ 201,38	Cantidad :		1
		Precio Unitario :		\$ 1.385,99
Precio Unitario	\$ 1.385,99	Total :		\$ 1.385,99
p.u. **s on mil trecientos ochenta y cinco pesos 99/100 M.N. **				

Las matrices anteriores refieren la suma de los costos de material, mano de obra, depreciación de maquinaria y equipo, con valores conservadores de costos indirectos y utilidad. Los precios fijados en estas matrices se establecen a partir de precios de mercado para compras al menudeo. A pesar de que los costos de mano de obra pueden variar en la producción de concretos normales a concretos ligeros, estas afectaciones no fueron consideradas en la resolución de estos precios unitarios debido a que no existen parámetros para establecer dichas diferencias.

TABLA 5.19 PRECIO UNITARIO CONCRETO LIGERO

CONCEPTO				
CONCRETO HECHO EN OBRA F'C=250 kg/cm ² , RESISTENCIA NORMAL, T.M.A. 20 mm AGREGADOS LIGEROS TEZONTLE - POMEZ				
Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Total
MATERIALES				
CEMENTO NORMAL CPC 30	TON	0,480	\$ 1.900,00	\$ 912,00
ARENA POMEZ	m ³	0,478	\$ 180,00	\$ 86,04
GRAVA TEZONTLE 20 mm TMA	m ³	0,394	\$ 200,00	\$ 78,80
AGUA DE TOMA MUNICIPAL	m ³	0,398	\$ 60,00	\$ 23,88
Total de Materiales				\$ 1.100,72
MANO DE OBRA				
CUADRILLA No 103 (1 OPERADOR DE REVOLVEDORA MAS 7 PEONES	JOR	0,0666	\$ 2.728,66	\$ 181,73
Total de Mano de Obra				\$ 181,73
EQUIPO				
REVOLVEDORA PARA CONCRETO MPSA-KOHLER R-10 8 H.P. 1 SACO	Hora	0,5333	\$ 26,49	\$ 14,13
Total de Equipo				\$ 14,13
Costo Directo	\$ 1.296,58	Unidad :		m ³
Indirectos y utilidad (19.00%)	\$ 220,42	Cantidad :		1
		Precio Unitario :		\$ 1.517,00
Precio Unitario	\$ 1.517,00	Total :		\$ 1.517,00
p.u. **s on mil quinientos diecisiete pesos 00/100 M.N. **				

TABLA 5.20 PRESUPUESTO DE CONCRETO Y ACERO EDIFICIO DE CONCRETO PESO NORMAL

Material	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Importe
Concreto	m3	526,80	\$1.385,99	\$730.142,86
Acero	ton	65,23	\$10.300,00	\$671.918,14
TOTAL				\$1.402.061,00

TABLA 5.21 PRESUPUESTO DE CONCRETO Y ACERO EDIFICIO DE CONCRETO LIGERO

Material	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Importe
Concreto	m3	468,23	\$1.517,00	\$710.310,98
Acero	ton	53,28	\$10.300,00	\$548.740,04
TOTAL				\$1.259.051,02

Lo anterior representa que, para el caso en estudio, el costo de la estructura se redujo al 90%. Obteniéndose así un ahorro que resulta en un porcentaje similar al de las utilidades generadas usualmente en la construcción, lo que justificaría su empleo.

A lo largo de este capítulo observamos algunas de las variables (físicas y económicas) que influyen en el diseño de estructuras de concreto normal y concreto ligero, sin embargo, cabe mencionar que no son los únicos factores en este fenómeno. Entre los factores más importantes que varían los resultados aquí descritos se encuentran, sin duda, el tipo de suelo en el que se desplanta la estructura y el uso que se le vaya a dar a la misma. Para este caso elegimos una estructura cuyo uso es un hospital y se encuentra clasificada dentro del grupo A (estructuras importantes en su funcionamiento en las cuales se tiene especial cuidado en evitar su falla ante catástrofes) y desplantada sobre un suelo en la zona B Tipo III (blando) de acuerdo a la clasificación del Manual de Obras Civiles de Diseño por Sismo. Si la estructura no fuera del grupo A, el espectro de diseño no se hubiese afectado por un factor de 1,5 por lo que el diseño por sismo no tendría los cambios que aquí se marcaron sino que esta afectación sería probablemente menor. Por otro lado, si la estructura estuviese desplantada en otro tipo de suelo ó en otra zona sísmica del país los resultados también se verían notablemente afectados. Por lo anterior, no se podría generalizar que cuando se emplea el concreto ligero resulta una opción más económica, sino que se necesitarían evaluar las opciones.

BIBLIOGRAFÍA:

- **Gobierno del Distrito Federal, (2004)** “Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal,” Gaceta Oficial del Gobierno del Distrito Federal, México, D.F.
- **Gobierno del Distrito Federal, (2004)** “Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto,” Gaceta Oficial del Gobierno del Distrito Federal, México, D.F.
- **Gobierno del Distrito Federal, (2004)** “Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismo,” Gaceta Oficial del Gobierno del Distrito Federal, México, D.F.
- **Comisión Federal de Electricidad, (1993)** “Manual de Diseño de Obras Civiles Diseño por Sismo”. México.
- **Meli Piralla R., (2001)** “Diseño estructural,” Editorial Limusa, primera reimpresión de la segunda edición, México.
- **González Cuevas y Robles Fernández, (2005)** “Aspectos Fundamentales del Concreto Reforzado”. Editorial Limusa, México.
- **Santiago Loera y Carlos Javier Mendoza, (1991)** “Comentarios, Ayudas de Diseño y Ejemplos de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto, DDF” Instituto de Ingeniería UNAM, México.
- **EDIFUR, (1992)** “Matrices Desglosadas 1992 Costos y Presupuestos Edificación y Urbanización” Tomo 3, Peimbert, México.

6. RECOMENDACIONES EMITIDAS EN LOS CÓDIGOS

Con lo que respecta al concreto ligero, el American Concrete Institute desarrolla una serie de recomendaciones en relación a la calidad del concreto, mezclado, colocación, detalles de acero de refuerzo, análisis, diseño, requisitos de resistencia, funcionamiento, cortante, torsión, longitudes de desarrollo y empalmes para el refuerzo, concretos presforzados, recubrimientos y disposiciones generales para el diseño sísmico. Algo similar describe el Código de Nueva Zelanda, lugar donde la sismicidad frecuente conlleva a realizar estudios vastos para la protección, seguridad y economía de sus construcciones. Ambas recomendaciones son tratadas de manera somera en el presente capítulo. Cabe mencionar que El Reglamento de Construcciones del Distrito Federal fue omitido ya que contiene muy poca información en este rubro.

6.1. RECOMENDACIONES EMITIDAS POR EL ACI (ACI-318-05)

Definiciones

Agregado ligero. Agregado con una densidad cuando está seco y suelto de 1120 kg/m^3 o menos.

Concreto estructural ligero. Concreto con agregado ligero que cumple con las especificaciones, y tiene una densidad de equilibrio que no excede 1840 kg/m^3 . En este reglamento, un concreto ligero sin arena natural se llama “concreto ligero en todos sus componentes” y un concreto ligero en el que todo el agregado fino es arena de masa normal se llama “concreto ligero con arena de masa normal”.

Exposición al congelamiento y deshielo

Para el concreto ligero no se especifican las relaciones agua-cemento máximas, dado que es incierta la determinación de la absorción del agregado, lo cual hace incierto el cálculo de la relación agua-cemento. El uso de una resistencia especificada a la compresión mínima, f'_c , asegura el uso de pasta de cemento de alta calidad.

Calidad del concreto, mezclado y colocación

Las secciones correspondientes a módulo de ruptura, resistencia al cortante del concreto y adherencia del refuerzo requieren modificaciones en los criterios de diseño para el empleo de concreto ligero. Se proporcionan dos procedimientos alternativos de modificación. Una alternativa se basa en ensayos de laboratorio para determinar la relación entre la resistencia promedio a la tensión por agrietamiento f_{ct} y la resistencia especificada a la compresión f'_c para el concreto ligero. Se pretende que antes del diseño se obtengan los valores apropiados de f_{ct} para un agregado ligero de una determinada fuente.

Las recomendaciones para el diseño de las mezclas de concreto ligero se proporcionan en “Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete” (ACI 211.2). (En esta recomendación se describe un método para dosificar y ajustar el concreto estructural que contiene agregados ligeros visto en capítulos anteriores).

Detalles del refuerzo

Cuando el concreto vaya a estar expuesto a fuentes externas de cloruros, tales como sales descongelantes, agua salobre, agua de mar, o salpicaduras de estas fuentes, debe dosificarse para satisfacer los requisitos de exposición especial. Estos comprenden contenido mínimo de aire, relación agua-cemento máxima, resistencia mínima para concreto de masa normal y concreto ligero, contenido máximo de iones cloruro en el concreto y tipo de cemento. Adicionalmente, como protección contra la corrosión se recomienda un recubrimiento mínimo del refuerzo de 50 mm para muros y losas; y de 60 mm para otros elementos.

Análisis y diseño. Consideraciones generales

El módulo de elasticidad, E_c , para el concreto puede tomarse como $w_c^{1.5}(0,043\sqrt{f'_c})$ en MPa, para valores de w_c comprendidos entre 1500 y 2500 kg/m³. Para concreto de densidad normal, E_c puede tomarse como $4700\sqrt{f'_c}$, en MPa.

Requisitos de resistencia y funcionamiento

Los peraltes o espesores mínimos establecidos en la Tabla 6.1 deben aplicarse a los elementos que trabajan en una dirección que no soporten o estén ligados a muros divisorios u otro tipo de elementos susceptibles de dañarse debido a deflexiones grandes, a menos que el cálculo de las deflexiones indique que se puede utilizar un espesor menor sin causar efectos adversos.

TABLA 6.1. PERALTES O ESPESORES MÍNIMOS DE VIGAS NO PREEFORZADAS O LOSAS REFORZADAS EN UNA DIRECCIÓN A MENOS QUE SE CALCULEN LAS DEFLEXIONES.

Elementos	Peralte mínimo, h			
	Simplemente apoyados	Con un extremo continuo	Ambos extremos continuos	En voladizo
	Elementos que no soporten o estén ligados a divisiones u otro tipo de elementos susceptibles de dañarse debido a deflexiones grandes.			
Losas macizas en una dirección	L/20	L/24	L/28	L/10
Vigas o losas nervadas en una dirección	L/16	L/18.5	L/21	L/8

Los valores dados en esta tabla se deben usar directamente en elementos de concreto de masa normal $w_c = 2400$ kg/m³ y acero de refuerzo 420 MPa. Para otras condiciones, los valores deben modificarse como sigue:

- Para concreto ligero estructural de masa unitaria w_c dentro del rango de 1500 a 2000 kg/m³, los valores de la tabla deben multiplicarse por $(1,65 - 0,0003w_c)$, pero no menos de 1,09, w_c en kg/m³.
- Para f_y distinto de 420 MPa, los valores de esta tabla deben multiplicarse por $(0,4 + f_y/700)$, en MPa.

Los valores de altura o espesor mínimo deben modificarse si se utilizan concretos que no sean de masa normal y refuerzo con una resistencia a la fluencia diferente de 420 MPa. Las notas de la tabla son esenciales para elementos de concreto reforzado construidos con concreto ligero estructural o con refuerzo que tenga una resistencia a la fluencia especificada, f_y , distinta de 420 MPa. Si se dan ambas condiciones, deben aplicarse las correcciones (a) y (b) indicadas al pie de la tabla.

No se dan correcciones para concreto cuya densidad esté entre 1900 kg/m³ y 2300 kg/m³, puesto que el factor de corrección debe estar próximo a la unidad en este rango.

En la parte de control de deflexiones, para elementos reforzados en una dirección (no preesforzados) indica:

A menos que los valores de rigidez se obtengan mediante un análisis más completo, las deflexiones inmediatas deben calcularse usando el módulo de elasticidad del concreto, E_c , que se especifica en este código (para concreto de masa normal o ligero) y el momento de inercia efectivo, I_e , que se indica a continuación, pero sin tomarlo mayor que I_g .

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \quad (6.1)$$

donde

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t} \quad (6.2)$$

- M_{cr} Momento de agrietamiento, en N.mm
- M_a Momento máximo de servicio presente en el elemento en la etapa para la que se calcula la deflexión, en N.mm
- I_g Momento de inercia de la sección bruta del elemento con respecto al eje que pasa por el centroide, en mm⁴
- I_{cr} Momento de inercia de la sección agrietada transformada a concreto, en mm⁴

para concreto de masa normal

$$f_r = 0,7 \sqrt{f'_c} \quad \text{en MPa} \quad (6.3)$$

f_r Módulo de ruptura del concreto, en MPa.

Cuando se use concreto con agregado ligero, debe aplicarse alguna de las modificaciones siguientes:

- (a) Cuando el valor de f_{ct} esté especificado y la dosificación del concreto esté de acuerdo con la especificación de este reglamento, f_r debe modificarse sustituyendo $\sqrt{f'_c}$ por $1,8 f_{ct}$, pero el valor de $1,8 f_{ct}$ usado no debe exceder de $\sqrt{f'_c}$, donde f'_c y f_{ct} están en Mpa.
- (b) Cuando no se especifique f_{ct} , f_r debe multiplicarse por 0,75 para concreto ligero en todos sus componentes, y por 0,85 para concreto ligero con arena de masa normal. Se permite interpolar linealmente si se usa una sustitución parcial de la arena.

donde:

f_{ct} es la resistencia promedio al agrietamiento por tensión del concreto ligero, en MPa

El procedimiento para obtener el momento de inercia efectivo, descrito en el reglamento, se seleccionó considerando que es suficientemente preciso para emplearse en el control de deflexiones. El momento de inercia efectivo I_e se desarrolló para proporcionar una transición entre los límites superior e inferior de I_g e I_{cr} , como función de la relación M_{cr}/M_a . En la mayoría de los casos prácticos, I_e será menor que I_g .

En la parte Control de deflexiones, elementos reforzados en una dirección (no preesforzados) indica:

A menos que los valores se obtengan mediante un análisis más completo, la deflexión adicional a largo plazo, resultante del flujo plástico y retracción de elementos en flexión (concreto normal o ligero), debe determinarse multiplicando la deflexión inmediata causada por la carga permanente por el factor λ_Δ .

$$\lambda_\Delta = \frac{\xi}{1 + 50\rho'} \quad (6.4)$$

donde ρ' es el valor del porcentaje de acero de compresión en la mitad del claro para tramos simples y continuos y en el punto de apoyo para voladizos. Puede tomarse ξ , el factor dependiente del tiempo para cargas sostenidas, igual a:

- 5 años o más 2,0
- 12 meses 1,4
- 6 meses 1,2
- 3 meses 1,0

Cortante y torsión

Las disposiciones para la resistencia a cortante y torsión se aplican al concreto de densidad normal. Cuando se emplea concreto con agregado ligero, debe aplicarse alguna de las siguientes modificaciones para $\sqrt{f'_c}$ en este capítulo:

- (a) Cuando se ha especificado el valor de f_{ct} y el concreto se ha dosificado de acuerdo con este código, debe reemplazarse $\sqrt{f'_c}$ por $1,8 f_{ct}$, pero el valor de $1,8 f_{ct}$ no debe exceder $\sqrt{f'_c}$, donde f'_c y f_{ct} están en Mpa.
- (b) Cuando el valor f_{ct} no esté especificado, todos los valores de $\sqrt{f'_c}$ deben multiplicarse por 0,75 para concreto ligero en todos sus componentes, y por 0,85 para concreto ligero con arena de masa normal. Se permite usar una interpolación lineal cuando la arena se sustituya parcialmente.

Existen casos en los cuales no aplica lo anterior como en los límites para el espaciamiento del refuerzo de cortante, en el límite superior que se debe considerar para el cortante resistente, en la resistencia al momento torsional y en el límite superior del esfuerzo resistente nominal de cortante.

Se dan dos procedimientos alternativos para modificar las disposiciones para cortante y torsión cuando se emplee concreto con agregado ligero. La modificación para concreto ligero se aplica únicamente a los términos que contienen $\sqrt{f'_c}$ en las ecuaciones de este capítulo.

La primera alternativa está basada en ensayos de laboratorio para determinar la relación entre la resistencia promedio a la tensión por agrietamiento f_{ct} y la resistencia especificada a la compresión f'_c para el concreto ligero que se esté utilizando. Para concreto de masa normal, la resistencia promedio a la tensión por agrietamiento f_{ct} es aproximadamente igual a $\sqrt{f'_c}/1,8$.

La modificación también puede estar basada en la suposición de que la resistencia a la tensión del concreto ligero es una fracción fija de la resistencia a la tensión del concreto de masa normal. Los factores están basados en datos de ensayos sobre numerosos tipos de concreto estructural de agregado ligero.

El coeficiente de fricción μ en las ecuaciones relacionadas con el cortante por fricción debe ser tomado como:

Para concreto colocado monolíticamente.....	1,4 λ
Para concreto colocado sobre concreto endurecido con la superficie intencionalmente rugosa como se especifica en este código.....	1,0 λ
Para concreto colocado sobre concreto endurecido no intencionalmente rugoso.....	0,6 λ
Para concreto anclado a acero estructural mediante pernos con cabeza o mediante barras de refuerzo.....	0,7 λ

donde $\lambda = 1,0$ para concreto normal, 0,85 para concreto ligero con arena de masa normal y 0,75 para concreto ligero en todos sus componentes. Se permite usar interpolación lineal si se emplea sustitución parcial de arena.

En la parte de disposiciones especiales para ménsulas y cartelas menciona:

El diseño del refuerzo de cortante por fricción, A_{vf} para resistir V_u debe cumplir con los requisitos correspondientes a cortante por fricción, donde:

- Para concreto de densidad normal V_n no debe tomarse mayor que el menor de $0,2f'_c b_w d$ ó $5,5b_w d$.
- Para el concreto ligero en todos sus componentes o concreto ligero con arena de masa normal V_n no debe tomarse mayor que el menor de $(0,2 - 0,07a_v/d)f'_c b_w d$ ó $(5,5 - 1,9a_v/d)b_w d$.

donde:

A_{vf}	Área de refuerzo de cortante por fricción, en mm^2
V_u	Fuerza cortante última en la sección, en N
V_n	Resistencia nominal a cortante, en N
b_w	Ancho del alma, en mm
d	Distancia desde la fibra extrema en compresión hasta el centroide del refuerzo longitudinal en tensión, en mm
a_v	Distancia, en mm, del centro de una carga concentrada a (a) la cara del apoyo para elementos continuos o en voladizo (b) el centro del apoyo para elementos simplemente apoyados

Algunos ensayos han demostrado que la resistencia máxima al cortante de ménsulas o cartelas hechas de concreto ligero es función tanto de f'_c como de a_v/d . No se dispone de datos para cartelas o ménsulas hechas de concreto ligero con arena de masa normal. Como resultado, se han aplicado las mismas limitaciones en ménsulas y cartelas tanto de concreto ligero en todos sus componentes como en concreto ligero con arena de masa normal.

Longitudes de desarrollo y empalmes del refuerzo.

En la parte de desarrollo de barras corrugadas y de alambres a tensión dice:

Para barras corrugadas y alambres corrugados l_d debe ser:

$$l_d = \left(\frac{9}{10} \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} \frac{\psi_t \psi_e \psi_s \lambda}{\left(\frac{c_b + K_{tr}}{d_b} \right)} \right) d_b \quad (6.5)$$

donde:

- l_d Longitud de desarrollo en tensión para barras corrugadas, alambres corrugados, refuerzo electrosoldado de alambre liso o corrugado, o torones de preesfuerzo, en mm
- ψ_t Factor de modificación para la longitud de desarrollo con base en la localización del refuerzo
- ψ_e Factor de modificación para la longitud de desarrollo con base en el revestimiento del refuerzo
- ψ_s Factor de modificación para la longitud de desarrollo con base en el tamaño del refuerzo
- λ Factor de modificación relacionado con la densidad del concreto
- c_b La menor, en mm, de
 - (a) la distancia medida del centro de una barra o alambre a la superficie más cercana del concreto
 - (b) la mitad de la separación centro a centro de las barras o alambres que se desarrollan
- K_{tr} Índice de refuerzo transversal
- d_b Diámetro nominal de una barra, alambre o torón de preesforzado, en mm

Los factores a usar en las expresiones para la longitud de desarrollo de barras y alambres corrugados en tensión son los siguientes:

- (a) Cuando para el refuerzo horizontal se colocan más de 300 mm de concreto fresco debajo de la longitud de desarrollo o un empalme, $\psi_t = 1,3$. Otras situaciones $\psi_t = 1,0$.
- (b) Barras o alambres con recubrimiento epóxico con menos de $3d_b$ de recubrimiento, o separación libre menor de $6d_b$, $\psi_e = 1,5$. Para todas las otras barras o alambres con recubrimiento epóxico,

$\psi_e=1,2$. Refuerzo sin recubrimiento, $\psi_e=1,0$. No obstante, el producto $\psi_t\psi_e$ no necesita ser mayor de 1,7.

(c) Para barras N°19 o menores y alambres corrugados, $\psi_s=0,8$. Para barras N°22 y mayores, $\psi_s=1,0$.

(d) Donde se use concreto ligero, $\lambda=1,3$. No obstante, cuando f_{ct} se especifica, λ puede tomarse como $0,56\sqrt{f'_c}/f_{ct}$ (en Mpa) pero no menor que 1,0. Donde se utilice concreto de masa normal, $\lambda=1,0$.

λ es un factor que refleja la menor resistencia a la tensión del concreto ligero y la reducción resultante en la resistencia al agrietamiento, lo cual incrementa la longitud de desarrollo en el concreto ligero.

El factor λ para concreto con agregado ligero se hizo igual para todos los tipos de agregados en el reglamento anterior. La investigación en barras ancladas con ganchos no apoyó las variaciones especificadas en las ediciones previas para “concreto ligero en todos sus componentes” y para “concreto ligero con arena de masa normal”, y se seleccionó un valor único de 1,3. Se permite usar un factor más bajo cuando se especifique la resistencia al agrietamiento por flexión del concreto ligero.

En el apartado relacionado con el desarrollo de ganchos estándar en tensión menciona:

Para las barras corrugadas, l_{dh} debe ser $(0,24\psi_e\lambda f_y/\sqrt{f'_c})d_b$ (en MPa) con $\psi_e=1,2$ para refuerzo con recubrimiento epóxico y, $\lambda=1,3$ para concreto con agregados ligeros. Para otros casos, ψ_e y λ deben tomarse igual a 1,0.

donde:

l_{dh} Longitud de desarrollo en tensión de barras corrugadas o alambres corrugados con un gancho estándar, medida desde la sección crítica hasta el extremo exterior del gancho (longitud recta embebida en el concreto entre la sección crítica y el inicio del gancho [punto de tangencia] más el radio interno del dobléz y un diámetro de barra), en mm

El factor debido a refuerzo en exceso se aplica sólo cuando no se requiere específicamente de un anclaje o longitud de desarrollo que permita alcanzar f_y . El factor λ para concreto ligero es una simplificación de un procedimiento del ACI 318-83 en el cual el incremento varía de 18% a 33%, según la cantidad de agregado ligero utilizada. A diferencia de la longitud de desarrollo para una barra recta, no se hace distinción alguna entre las barras de la parte superior y las otras barras; en todo caso, esta distinción es difícil para barras con gancho. Se especifica un valor mínimo de l_{dh} para evitar falla por extracción directa en casos en que el gancho esté situado muy cerca de la sección crítica. Los ganchos no pueden considerarse efectivos en compresión.

Concreto preesforzado

En la parte de diseño de las zonas de anclaje para tendones de un alambre o barras de 16 mm de diámetro y de diseño de la zona para tendones de losa comentan:

Los ensayos en los que se basaron las recomendaciones se limitaron a dispositivos de anclaje para torones no adheridos de 12,5 mm de diámetro y 1863 MPa de esfuerzo de fluencia, en elementos de concreto de masa normal. Así, para los dispositivos de anclaje de torones mayores y para todo uso en losas de concreto ligero, el comité ACI-ASCE 423 recomendó que la cantidad y espaciamiento del refuerzo debe ser ajustado en forma conservadora para tomar en cuenta la mayor fuerza de anclaje y la menor resistencia a tensión por agrietamiento del concreto ligero.

Cascarones y losas plegadas

En la parte de refuerzo de los cascarones dice:

El refuerzo por tensión debe disponerse en dos o más direcciones y debe proporcionarse de manera tal que su resistencia en cualquier dirección iguale o exceda a la componente de esfuerzos internos en esa dirección. Alternativamente, el refuerzo para los esfuerzos de membrana en la losa puede calcularse como el refuerzo requerido para resistir las fuerzas de tensión axial más las fuerzas de tensión debidas al cortante por fricción necesario para transferir el cortante a través de cualquier sección transversal de la membrana. El coeficiente de fricción, μ , no debe exceder $1,0 \lambda$, donde $\lambda=1,0$ para concreto de masa normal, $0,85$ para concreto ligero con arena de masa normal, y $0,75$ para concreto ligero en todos sus componentes. Se permite la interpolación lineal cuando se usa reemplazo parcial de arena.

Disposiciones especiales para el diseño sísmico.

La resistencia especificada a la compresión del concreto ligero, f'_c , no debe ser mayor que 35 MPa a menos que se demuestre, por medio de evidencia experimental, que los elementos estructurales hechos con dicho concreto ligero proporcionan resistencia y tenacidad iguales o mayores que las de elementos comparables hechos con concreto de masa normal de la misma resistencia.

La máxima resistencia especificada a la compresión del concreto ligero a emplear en cálculos de diseño estructural se limita a 35 MPa, debido principalmente a la insuficiencia de datos de campo y experimentales acerca del comportamiento de elementos hechos con concreto de agregado ligero, sometidos a desplazamientos alternantes en el rango no lineal. Si se desarrolla evidencia convincente para alguna aplicación específica, se puede incrementar el límite de resistencia máxima especificada a la compresión del concreto ligero al nivel justificado por la evidencia.

En la parte que corresponde a nudos en pórticos especiales resistentes a momento dice:

Donde el refuerzo longitudinal de una viga atraviesa una unión viga-columna, la dimensión de la columna paralela al refuerzo de la viga no debe ser menor que 20 veces el diámetro de la barra longitudinal de mayor diámetro de la viga, para concretos de masa normal. Para concretos ligeros, la dimensión no debe ser menor que 26 veces el diámetro de la barra.

Investigaciones han mostrado que las barras rectas en vigas pueden deslizar dentro del nudo viga-columna durante una secuencia de inversiones de momento de gran magnitud. Los esfuerzos de

adherencia en estas barras rectas pueden ser muy altos. Para reducir sustancialmente el deslizamiento durante la formación de rótulas en las vigas adyacentes, sería necesario tener una relación entre el diámetro de la barra y la dimensión de la columna de aproximadamente 1/32, lo que conduciría a nudos muy grandes. Con base en una revisión de los ensayos disponibles, se han elegido límites de 1/20 de la profundidad de la columna en la dirección de la carga como tamaño máximo de las barras en vigas de concreto de masa normal, y un límite de 1/26 para concreto ligero. Debido a la falta de datos específicos, en la modificación para concreto ligero usa el factor 1,3 del capítulo de longitud de anclaje. Este límite proporciona un control razonable del deslizamiento potencial de las barras de la viga en el nudo viga-columna, considerando el número de excursiones inelásticas previstas en el pórtico durante un sismo fuerte.

En la parte de nudos en pórticos especiales resistentes a momento, para la longitud de desarrollo de barras en tensión se indica:

La longitud de desarrollo l_{dh} para una barra con gancho estándar de 90° en concreto de masa normal no debe ser menor que el mayor valor entre $8d_b$, 150 mm, y la longitud requerida por la siguiente ecuación

$$l_{dh} = \frac{f_y d_b}{5.4 \sqrt{f'_c}} \quad \text{en MPa} \quad (6.6)$$

para tamaños de barras N°10 a N°36. Para concreto ligero, l_{dh} para una barra con gancho estándar de 90° no debe ser menor que el mayor valor entre $10d_b$, 190 mm, y 1,25 veces la longitud requerida por la ecuación (6.6).

En concreto ligero, la longitud requerida por la ecuación (6.6) se debe incrementar en un 25% para compensar la variabilidad de las características de adherencia de barras de refuerzo en diversos tipos de concreto ligero.

6.2. RECOMENDACIONES EMITIDAS POR EL REGLAMENTO DE NUEVA ZELANDA (NZS 3101:1995)

Se muestra a continuación las partes del Reglamento de Nueva Zelanda en donde interviene el uso del concreto ligero.

Definiciones

Concreto ligero estructural. Un concreto que contiene un agregado ligero y tiene una masa volumétrica que no excede de 1850 kg/m^3 . En este reglamento, el concreto ligero sin arena natural es catalogado como “concreto ligero en todos sus componentes” y al concreto ligero en el que todo el agregado fino sea arena de masa normal se cataloga como “concreto ligero con arena de masa normal”.

Requerimientos del estado límite de diseño y propiedades de los materiales.

En Estados límite de servicio, Deflexiones, Peralte mínimo, aparece una tabla con el peralte mínimo de las vigas para las diferentes condiciones de apoyo y en las notas aparece la siguiente:

- (a) Para concreto ligero estructural con una densidad entre 1450-1850 kg/m³, los valores de la tabla serán multiplicados por (1,65 – 0,0003γ) donde γ es la densidad en kg/m³.

En estados límite de servicio, Deflexiones, Cálculo de deflexiones, menciona que la deflexión inmediata será calculada con el módulo de elasticidad E_C definido en la sección correspondiente (para concreto normal y concreto ligero) y con el momento de inercia efectivo I_e

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \quad (6.7)$$

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t} \quad (6.8)$$

En esa misma parte menciona que el cálculo de la deflexión a largo plazo, al igual que la inmediata, se calcula igual para concreto normal y concreto ligero.

$$k_{cp} = \left[2 - 1.2 \left(\frac{A'_s}{A_s} \right) \right] > 0.6 \quad (6.9)$$

En la parte Propiedades de materiales para diseño, Propiedades del concreto, Módulo de elasticidad, define el módulo de elasticidad para el concreto de densidades entre 1400 y 2500 kg/m³, que aquí entra el caso del concreto ligero, como:

$$E_C = \left(3320 \sqrt{f'_c} + 6900 \right) \left(\frac{\rho}{2300} \right)^{1.5} \quad MPa \quad (6.10)$$

donde:

ρ Masa volumétrica del concreto endurecido, en kg/m³

En la parte Propiedades de materiales para diseño, Propiedades del concreto, Módulo de ruptura, dice que cuando se usa el concreto ligero una de las siguientes modificaciones se aplicarán a las ecuaciones para determinar el módulo de ruptura:

- (a) Si f_{ct} es especificado y la mezcla del concreto es diseñada de acuerdo al NZS 3152, f_r será modificado sustituyendo $1,8 f_{ct}$ en lugar de $\sqrt{f'_c}$, pero el valor de $1,8 f_{ct}$ no excederá $\sqrt{f'_c}$

- (b) Si f_{ct} no es especificado, f_r será multiplicado por 0,75 para “concreto ligero en todos sus componentes” y por 0,85 para “concreto ligero con arena de masa normal”. Se hará una interpolación lineal para concretos intermedios.

En la parte Propiedades de materiales para diseño, Requerimientos adicionales para miembros dúctiles, indica que el concreto ligero estructural no será usado en estructuras diseñadas para un factor de ductilidad (μ) mayor que 1,25. Cabe señalar, que este factor no es el mismo que empleamos en nuestro código como Q aunque lo definan en forma muy similar.

Cortante y torsión

En la parte Requerimientos y principios generales, Resistencia a cortante, dice que las provisiones para calcular el esfuerzo cortante v_c que se mencionan anteriormente son aplicables para concreto normal. Cuando es usado el concreto ligero, alguna de las siguientes modificaciones será aplicada:

- (a) Si f_{ct} es especificado y la mezcla del concreto es diseñada de acuerdo al NZS 3152, las provisiones para v_c serán modificadas sustituyendo $1,8 f_{ct}$ en lugar de $\sqrt{f'_c}$, pero el valor de $1,8 f_{ct}$ no excederá $\sqrt{f'_c}$
- (b) Si f_{ct} no es especificado, todos los valores de $\sqrt{f'_c}$ que afecten a v_c serán multiplicados por 0,75 para “concreto ligero en todos sus componentes” y por 0,85 para “concreto ligero con arena de masa normal”. Se hará una interpolación lineal para concretos intermedios.

En la parte Requerimientos y principios generales, Cortante por fricción, menciona que el coeficiente de fricción, μ_f , en las ecuaciones será:

Para concreto colado monolíticamente o colado sobre concreto endurecido donde la superficie de transferencia a cortante está limpia, libre de aceite e intencionalmente corrugada con una amplitud no menor que 5 mm	1,4 λ
Para concreto colado sobre concreto endurecido donde la superficie de transferencia a cortante está limpia, libre de aceite e intencionalmente corrugada con una amplitud menor a 5 mm pero mayor a 2 mm.....	1,0 λ
Para concreto colado sobre acero estructural o concreto endurecido donde la superficie de transferencia a cortante está libre de aceite.....	0,7 λ

donde	$\lambda = 1,00$	para concreto normal
	$\lambda = 0,85$	para concreto ligero con arena de masa normal
	$\lambda = 0,75$	para concreto ligero en todos sus componentes

BIBLIOGRAFÍA:

- **American Concrete Institute ACI-318-05, (2005).** “Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary” ACI Committee 318
- **Reglamento de Construcción de Nueva Zelanda NZS 3101:PARTE 1, (1995)**

7. CONCLUSIONES

Hasta la fecha, el estudio de nuevos materiales para ser empleados en la construcción se ha enfocado a obtener materiales con resistencias mayores y poco se ha realizado sobre materiales que tengan una masa menor. Es por esta razón que se intervino en el estudio de los concretos ligeros.

El concreto ligero es aquel que tiene una masa volumétrica menor a los 1800 kg/m^3 y se puede obtener por diferentes medios, para este estudio se utilizaron agregados naturales ligeros (pómez y tezontle) que se encontraron en bancos cercanos al lugar en donde se realizaron las pruebas. Se presentaron dos clasificaciones del concreto ligero considerando los materiales que lo integran y sus propiedades, además de la masa volumétrica de la mezcla. Se revisaron las propiedades mecánicas de concretos ligeros que encajaron con la segunda clasificación aquí descrita.

En el procedimiento de fabricación de las mezclas de concreto ligero tiene ciertas diferencias con respecto al concreto de masa normal. La variación más importante es la cantidad de agua, para el concreto ligero la relación agua-cemento no se encuentra determinada en forma precisa ya que los agregados tienen una gran variabilidad en sus propiedades de absorción lo que hace difícil estimar la cantidad de agua real que reacciona con el cemento. Otra diferencia es la buena manejabilidad que se logra en las mezclas de concreto ligero debido a la cantidad de aire que naturalmente se incorpora.

Para poder lograr resistencias estructurales se empleó una relación agua-cemento relativamente mayor a la utilizada en un concreto de peso normal, esto se debe a que los agregados tienen características menos favorables.

Una vez producido el concreto ligero se le da el mismo tratamiento que al concreto de masa normal (colocación, acabado y curado), sin embargo se debe tener en cuenta que una excesiva vibración es perjudicial ya que existe segregación de los materiales con mayor facilidad.

Existen al menos dos métodos para poder obtener el proporcionamiento de una mezcla, para este estudio se empleó el método de proporcionamiento por masa, sin embargo, para los materiales empleados, dicho método resultó poco conservador para obtener los resultados esperados, por lo que fue necesario modificar los parámetros recomendados con el fin de alcanzar el propósito de este trabajo. La diferencia entre este método y los resultados del laboratorio se puede deber a que las tablas son referidas para cualquier tipo de agregado natural ligero y generalmente las propiedades varían considerablemente de un lugar de origen a otro.

Se lograron identificar tres grupos de trabajo: concretos de baja resistencia, de resistencia media y de resistencia estructural. Para el primer grupo se lograron resistencias a compresión entre 10 y 80 kg/cm^2 , con una resistencia a tensión cercana al 13% de la resistencia a compresión y un módulo de elasticidad cuya constante que relaciona la masa volumétrica y la resistencia a compresión es cercana a 7000. En el segundo grupo las resistencias a compresión oscilaron entre 130 y 160 kg/cm^2 , la resistencia a tensión tuvo un valor del 10% de la resistencia a compresión mientras que la relación entre el módulo de elasticidad, masa volumétrica y resistencia a compresión fue alrededor de 3500. En el tercer y último grupo se obtuvieron resistencias a compresión que variaron entre 190 y 230 kg/cm^2 , la resistencia a tensión fue del orden de 11% de la resistencia a compresión y la relación del módulo descrita anteriormente se acercó a 3500. En el ejemplo aplicado a un edificio se manejaron las características de un concreto del último grupo.

Se estudió un edificio de concreto reforzado de 4 niveles destinado a habitación hospitalaria. Se analizaron las propiedades para un edificio de concreto de masa normal y de concreto ligero. Este edificio se encuentra desplantado sobre un suelo blando y la estructura por su importancia se clasifica dentro del grupo A, lo que implica, entre otras cosas, un factor de carga ante acciones gravitacionales de 1,5 y un incremento en las ordenadas del espectro de diseño del 50%. El factor de comportamiento sísmico para ambos casos fue de 2,0 en ambas direcciones.

El peso propio de la estructura tuvo una reducción del 64%, que a su vez indujo una reducción en la masa sísmica total al 74%. Los periodos en la estructura de concreto ligero fueron mayores, como era de esperarse ya que el módulo de elasticidad era menor, haciendo más flexible la estructura. Finalmente, en el cortante basal hubo una reducción del 77%.

Las dimensiones de los elementos de concreto ligero quedaron regidas por la deformación, mientras que el concreto de masa normal rigió la resistencia.

El costo final de la estructura se redujo al 90% empleando concreto ligero. Para el diseño de este edificio se buscaron características extremas (aunque en la ciudad de México es un tanto frecuente encontrar estas características) para poder observar claramente los cambios que se experimentan al

emplear uno u otro tipo de concreto. Sin embargo, no se podría generalizar que cuando se emplea el concreto ligero resulta una opción más económica, sino que se necesitarían evaluar las opciones.

En el aspecto reglamentario no se cuenta con información acerca de que se deben hacer consideraciones particulares en los diseños a flexión y compresión del concreto ligero, únicamente existen para cortante y torsión. El diseño básicamente cambia en los temas ya mencionados de cortante y torsión. Además cambia el cálculo de deformaciones y longitudes de desarrollo de varillas.

Finalmente, dentro de las ventajas que se pueden observar, al haber realizado la comparativa, se encuentran las siguientes:

- Reducción importante de los elementos de cimentación.
- Al tener menor carga muerta, las fuerzas sísmicas son menores, lo que nos lleva a elementos de menor tamaño.
- Los elementos mecánicos por carga gravitacional se reducen.
- Al tener elementos más ligeros la transportación y colocación se hacen más eficientes.
- El concreto ligero tiene una mayor resistencia ante el fuego.
- En ampliaciones de estructuras se incrementa en menor porcentaje la carga muerta adicional.
- En el aspecto arquitectónico, se podrían lograr pisos volados de mayor longitud si logramos controlar las deformaciones.
- Es un buen aislador térmico.

Dentro de las características desfavorables podríamos apuntar:

- Mayor deformación tanto a corto plazo como a largo, debido a módulos de elasticidad más bajos y a factores que intervienen en el cálculo de las mismas que son especiales para concretos ligeros.
- Mayor contracción y por lo tanto el acero que se coloca por temperatura debería aumentar.
- Menor resistencia a la fuerza cortante, ya que las expresiones se ven modificadas e involucran la resistencia al agrietamiento por tensión en lugar de la raíz cuadrada de la resistencia a compresión.
- Mayor longitud de desarrollo, puesto que los factores que se emplean para su cálculo son mayormente castigados.
- Mayor costo debido a que se necesita una mayor cantidad de cemento.
- Disponibilidad de los materiales.

No cabe duda, que son muchas las diferencias entre los tipos de concreto estudiados. Este trabajo involucró algunas variables, pero queda aún un amplio campo en el cual se puede desarrollar investigación enfocada a la utilización de estos materiales en la industria de la construcción.

A. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS

Se presentan las características más relevantes de los materiales empleados en este estudio. Una breve descripción de las pruebas efectuadas se resume a continuación:

Masa volumétrica seca suelta

Esta propiedad física, de los agregados tanto finos como gruesos, es determinada mediante el producto de la masa bruta del material multiplicado por el factor del recipiente. Sus unidades se expresan generalmente en kg/m^3 y el método de prueba se encuentra definido en la NMX-C-077-ONNCCE. Consiste en un vaciado del material sobre un recipiente sin intervenir algún medio de colocación, se enrasa el recipiente y se obtiene su masa bruta al restar la masa del recipiente más el material de la masa del recipiente vacío. Esta magnitud generalmente es utilizada en los diseños de proporcionamientos y debe ser rectificada por el contenido de agua de la muestra analizada.

Masa volumétrica seca varillada

Al igual que la MVSS, su magnitud es determinada mediante el producto de la masa bruta del material multiplicado por el factor del recipiente, el método de prueba se encuentra definido en la NMX-C-077-ONNCCE. Consiste en un vaciado del material sobre un recipiente y colocarlo en capas con vibrado mediante penetración de una varilla de acero lisa con punta de bola.

Densidad

La densidad del material que interviene como componente en el concreto hidráulico, define alguna de sus propiedades mecánicas tales como la resistencia a compresión axial y su módulo de elasticidad; especifica de manera primordial el consumo de cemento en la mezcla.

Su magnitud en agregados gruesos y finos, es determinada por medio de su inmersión en agua bajo un recipiente lleno de agua con masa determinada, en el caso del agregado grueso existen varias alternativas para su análisis, de ellas las más usuales son la de canastilla sobre un eje de la balanza y el picnómetro. El método de prueba se encuentra normalizado en la NMX-C-164-ONNCCE.

Absorción

El conocer la magnitud de esta propiedad permite realizar los ajustes pertinentes en la utilización del agua incorporada a una mezcla de concreto hidráulico. El método de prueba se encuentra normalizado en la NMX-C-164-ONNCCE, consiste básicamente en la medición de la capacidad de retención de agua y para ello se lleva el material a su condición saturada superficialmente seca (sss). La relación entre esta condición y la masa seca del material permiten conocer la magnitud de esta propiedad.

Materia orgánica

Es importante que la mayor parte de los agregados utilizados tengan valores despreciables o ausentes de materia orgánica, su presencia ocasiona, la mayor parte de las veces, comportamientos impredecibles en la masa del concreto. El método de prueba esta normalizado en la NMX-C-088-ONNCCE.

Actualmente se lleva a cabo un análisis cualitativo referido a una solución estandarizada de color ámbar (9 g de FeCl_3 + 1 g de CoCl_3 en 100 ml de agua destilada + 7 gotas de HCl concentrado). El método describe que la muestra de agregado fino debe ser depositada en una solución al 3% de hidróxido de sodio (NaOH), en un periodo determinado su coloración no debe exceder la del estándar. Sí es el caso, la conclusión del análisis se define con la leyenda "PASA".

Desgaste los Ángeles

Se define así a la pérdida por abrasión que sufre el agregado grueso al ser sometido a un movimiento de choques caóticos provocados por la revolución de un cilindro con aspas interiores (máquina de los "Ángeles"). Es entonces la medida de la resistencia a la degradación por abrasión e impacto. La reducción del tamaño está en función de las características originales del agregado. Este método de prueba se encuentra normalizado en la NMX-C-198-ONNCCE.

Intemperismo en Sulfato de Sodio

Los cambios de temperatura provocan, en el sulfato de sodio, fuertes reacciones por efectos de contracción pero sobre todo por dilatación. El agregado sumergido en una solución saturada de Na_2SO_4 , y sometido a diferenciales de temperatura provoca rupturas y disminución del tamaño nominal de las partículas de las muestras analizadas. Su magnitud se encuentra especificada en la NMX-C-111-ONNCCE.

Módulo de Finura del Agregado Fino

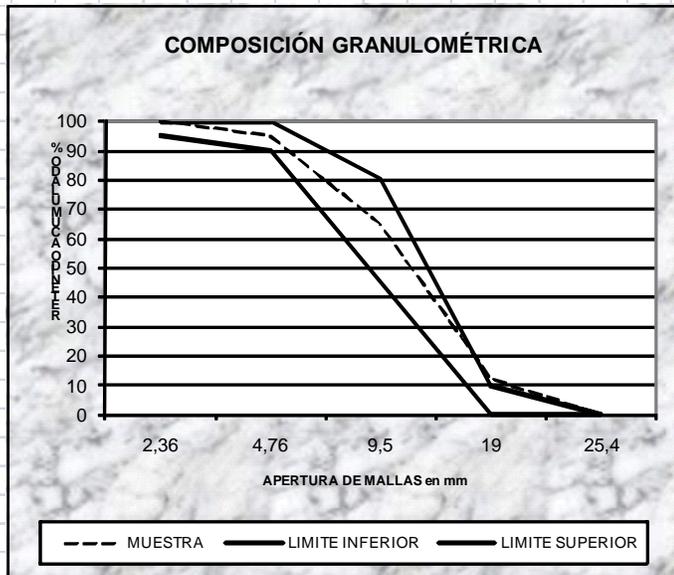
Es la sumatoria de los porcentajes retenidos acumulados a partir de la criba 4,75 mm (Malla N° 4) hasta la criba 0,150 mm (Malla N° 100), divididos entre 100.

ESTUDIO DE CALIDAD DE GRAVA PARA CONCRETO

LIEC-LAB-09

FECHA DE INFORME	2008-05-19	CLAVE DE OBRA	AD-48
CLIENTE	ING. SERGIO VALDES CONSTANTINO	OBRA	MATERIAL ENVIADO A LABORATORIO
PROCEDENCIA	LA PROVIDENCIA	FECHA DE MUESTREO	2008-05-15
DESCRIPCIÓN	ANDESITA 20 mm TMA	INFORME No.	LIEC.001.08
CON ATENCIÓN A:	ING. SERGIO VALDES		

TABLA DE RESULTADOS		
PROPIEDAD	VALOR	ESPECIFICACIÓN
MASA VOL. SECA SUELTA kg/m ³	1244	
MASA VOL. SECA VARILLADA kg/m ³	1385	
DENSIDAD	2,34	2,00 MÍN.
ABSORCIÓN %	4,55	6,00 MÁX.
PASA MALLA 200 (LAVADO) %	0	1,0 MÁX
MATERIA ORGANICA	PASA	DEBE PASAR
DESGASTE LOS ANGELES %	29,5	40,0 MÁX.
INTEMPERISMO EN NaSO ₄ %	8,9	12,0 MAX.



COMPOSICION GRANULOMETRICA			
TABLA DE DATOS			
2,36	100	95	100
4,76	95	90	100
9,50	65	45	80
19,0	12	0	10
25,4	0	0	0

OBSERVACIONES

ANALISIS INFORMATIVO - SE ESPECIFICAN PARAMETROS SUGERIDOS EN NMX-C-111-ONNCE (AGREGADOS PARA CONCRETO)

FORMULO:

FIRMA CLIENTE

ANTONIO VALDES JIMENEZ
GERENTE GENERAL

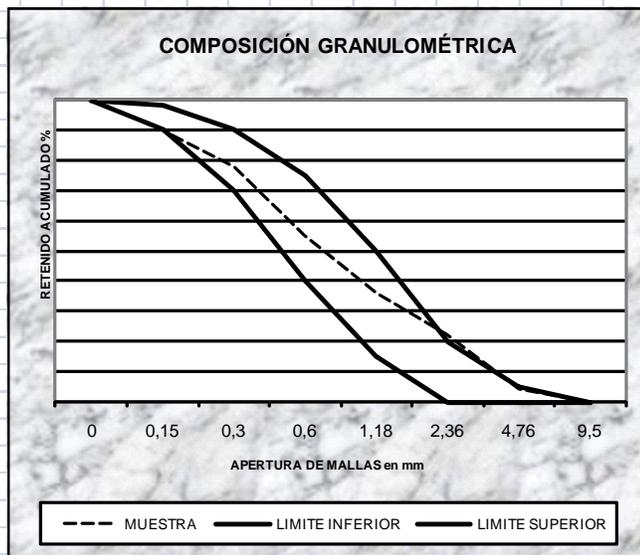
ESTE DOCUMENTO SOLO PUEDE SER REPRODUCIDO EN SU TOTALIDAD
ESTE INFORME SOLO CORRESPONDE A LAS MUESTRAS ENSAYADAS

ESTUDIO DE CALIDAD DE ARENA PARA CONCRETO

LIEC-LAB-10

FECHA DE INFORME	2008-05-19	CLAVE DE OBRA	AD-48
CLIENTE	ING. SERGIO VALDES CONSTANTINO	OBRA	MATERIAL ENVIADO A LABORATORIO
PROCEDENCIA	LA PROVIDENCIA	FECHA DE MUESTREO	2008-05-15
DESCRIPCIÓN	ARENA DE MINA	INFORME No.	LIEC.002.08
CON ATENCIÓN A:	ING. SERGIO VALDES		

TABLA DE RESULTADOS		
PROPIEDAD	VALOR	ESPECIFICACIÓN
MASA VOL. SECA SUELTA kg/m ³	1195	
MASA VOL. SECA VARILLADA kg/m ³	1398	
DENSIDAD	2,29	2,00 MÍN.
ABSORCIÓN %	3,85	6,00 MÁX.
PASA MALLA 200 (LAVADO) %	14,1	15,0 MÁX
MATERIA ORGANICA	PASA	DEBE PASAR
MODULO DE FINURA	2,81	2,4 - 3,1



COMPOSICION GRANULOMETRICA			
TABLA DE DATOS			
0,0	100	100	100
0,15	90	90	98
0,30	78	70	90
0,60	55	40	75
1,18	36	15	50
2,36	22	0	20
4,76	4	0	5
9,50	0	0	0

OBSERVACIONES

ANALISIS INFORMATIVO - SE ESPECIFICAN PARAMETROS SUGERIDOS EN NMX-C-111-ONNCC (AGREGADOS PARA CONCRETO)

FORMULO:

FIRMA CLIENTE

ANTONIO VALDES JIMENEZ
GERENTE GENERAL

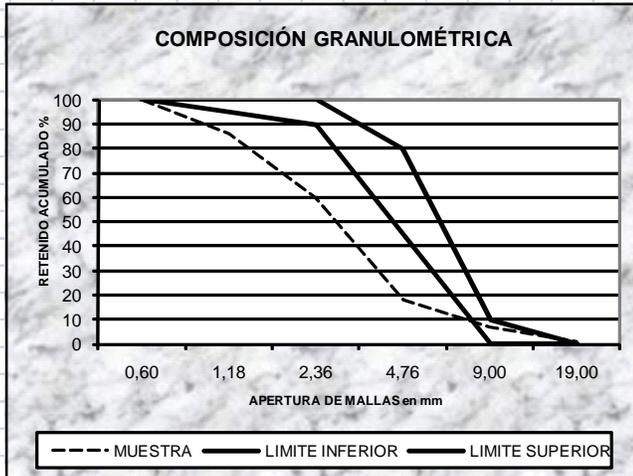
ESTE DOCUMENTO SOLO PUEDE SER REPRODUCIDO EN SU TOTALIDAD
ESTE INFORME SOLO CORRESPONDE A LAS MUESTRAS ENSAYADAS

ESTUDIO DE CALIDAD DE GRAVA PARA CONCRETO

LIEC-LAB-09

FECHA DE INFORME	2008-05-12	CLAVE DE OBRA	AD-48
CLIENTE	ING. SERGIO VALDES CONSTANTINO	OBRA	MATERIAL ENVIADO A LABORATORIO
PROCEDENCIA	BCO. MINA II ZAPOTITLAN	FECHA DE MUESTREO	2008-05-08
DESCRIPCIÓN	AGREGADO POMITICO 3/8" TMA	INFORME No.	LIEC.003.08
CON ATENCIÓN A:	ING. SERGIO VALDES		

TABLA DE RESULTADOS		
PROPIEDAD	VALOR	ESPECIFICACIÓN
MASA VOL. SECA SUELTA kg/m ³	538	
MASA VOL. SECA VARILLADA kg/m ³	596	
DENSIDAD	0,75	2,00 MÍN.
ABSORCIÓN %	33,20	6,00 MÁX.
PASA MALLA 200 (LAVADO) %	0,34	1,0 MÁX
MATERIA ORGANICA	PASA	DEBE PASAR
DESGASTE LOS ANGELES %	30,3	40,0 MÁX.
INTEMPERISMO EN NaSO ₄ %	24,9	12,0 MÁX.



COMPOSICION GRANULOMETRICA				
TABLA DE DATOS				
0,60	100	100	100	
1,18	86	95	100	
2,36	60	90	100	
4,76	18	45	80	
9,00	7	0	10	
19,00	1	0	0	

OBSERVACIONES

ANALISIS INFORMATIVO - SE ESPECIFICAN PARAMETROS SUGERIDOS EN NMX-C-111-ONNCE (AGREGADOS PARA CONCRETO)

FORMULO:

SIM BOLOS EMPLEADOS	
TMA	TAMAÑO MAXIMO DE AGREGADO
NaSO ₄	SULFATO DE SODIO

FIRMA CLIENTE

ANTONIO VALDES JIMENEZ
GERENTE GENERAL

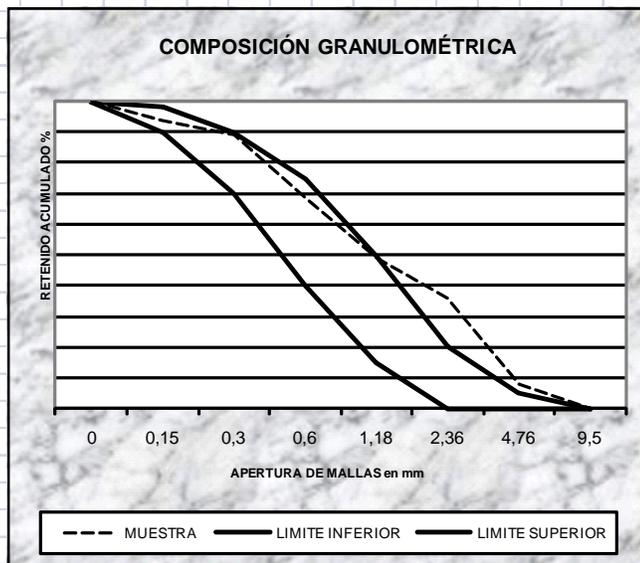
ESTE DOCUMENTO SOLO PUEDE SER REPRODUCIDO EN SU TOTALIDAD
ESTE INFORME SOLO CORRESPONDE A LAS MUESTRAS ENSAYADAS

ESTUDIO DE CALIDAD DE ARENA PARA CONCRETO

LIEC-LAB-10

FECHA DE INFORME	2008-05-19	CLAVE DE OBRA	AD-48
CLIENTE	ING. SERGIO VALDES CONSTANTINO	OBRA	MATERIAL ENVIADO A LABORATORIO
PROCEDENCIA	BCO. MINA II ZAPOTITLAN	FECHA DE MUESTREO	2008-05-15
DESCRIPCIÓN	ARENA POMITICA	INFORME No.	LIEC.004.08
CON ATENCIÓN A:	ING. SERGIO VALDES		

TABLA DE RESULTADOS		
PROPIEDAD	VALOR	ESPECIFICACIÓN
MASA VOL. SECA SUELTA kg/m ³	648	
MASA VOL. SECA VARILLADA kg/m ³	711	
DENSIDAD	0,78	2,00 MÍN.
ABSORCIÓN %	34,80	6,00 MÁX.
PASA MALLA 200 (LAVADO) %	10,2	15,0 MÁX
MATERIA ORGANICA	PASA	DEBE PASAR
MODULO DE FINURA	3,37	2,4 - 3,1



COMPOSICION GRANULOMETRICA			
TABLA DE DATOS			
0,0	100	100	100
0,15	94	90	98
0,30	89	70	90
0,60	69	40	75
1,18	49	15	50
2,36	36	0	20
4,76	8	0	5
9,50	0	0	0

OBSERVACIONES

ANALISIS INFORMATIVO - SE ESPECIFICAN PARAMETROS SUGERIDOS EN NMX-C-111-ONNCE (AGREGADOS PARA CONCRETO)

FORMULO:

FIRMA CLIENTE

ANTONIO VALDES JIMENEZ
GERENTE GENERAL

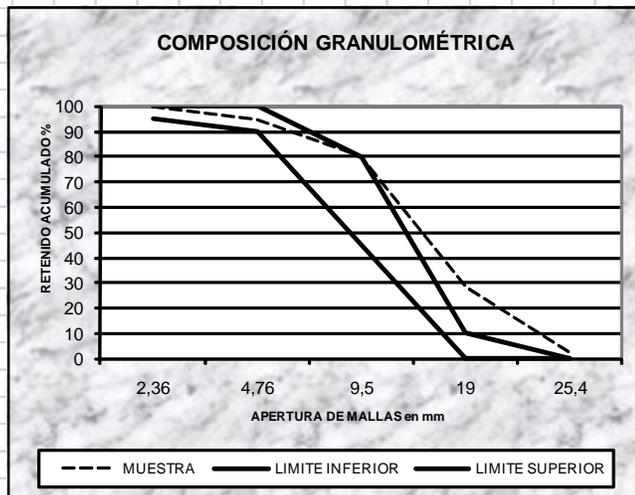
ESTE DOCUMENTO SOLO PUEDE SER REPRODUCIDO EN SU TOTALIDAD
ESTE INFORME SOLO CORRESPONDE A LAS MUESTRAS ENSAYADAS

ESTUDIO DE CALIDAD DE GRAVA PARA CONCRETO

LIEC-LAB-09

FECHA DE INFORME	2008-05-20	CLAVE DE OBRA	AD-48
CLIENTE	ING. SERGIO VALDES CONSTANTINO	OBRA	MATERIAL ENVIADO A LABORATORIO
PROCEDENCIA	LA PROVIDENCIA	FECHA DE MUESTREO	2008-05-19
DESCRIPCIÓN	TEZONTLE 20 mm TMA	INFORME No.	LIEC.005.08
CON ATENCIÓN A:	ING. SERGIO VALDES		

TABLA DE RESULTADOS		
PROPIEDAD	VALOR	ESPECIFICACIÓN
MASA VOL. SECA SUELTA kg/m ³	952	
MASA VOL. SECA VARILLADA kg/m ³	1047	
DENSIDAD	2,17	2,00 MÍN.
ABSORCIÓN %	4,57	6,00 MÁX.
PASA MALLA 200 (LAVADO) %	0	1,0 MÁX
MATERIA ORGANICA	PASA	DEBE PASAR
DESGASTE LOS ANGELES %	25,1	40,0 MÁX.
INTEMPERISMO EN NaSO ₄ %	8,2	12,0 MAX.



COMPOSICION GRANULOMETRICA				
TABLA DE DATOS				
2,36	100	95	100	
4,76	95	90	100	
9,50	80	45	80	
19,0	28	0	10	
25,4	2	0	0	

OBSERVACIONES

ANALISIS INFORMATIVO - SE ESPECIFICAN PARAMETROS SUGERIDOS EN NMX-C-111-ONNCC (AGREGADOS PARA CONCRETO)

FORMULO:

FIRMA CLIENTE

ANTONIO VALDES JIMENEZ
GERENTE GENERAL

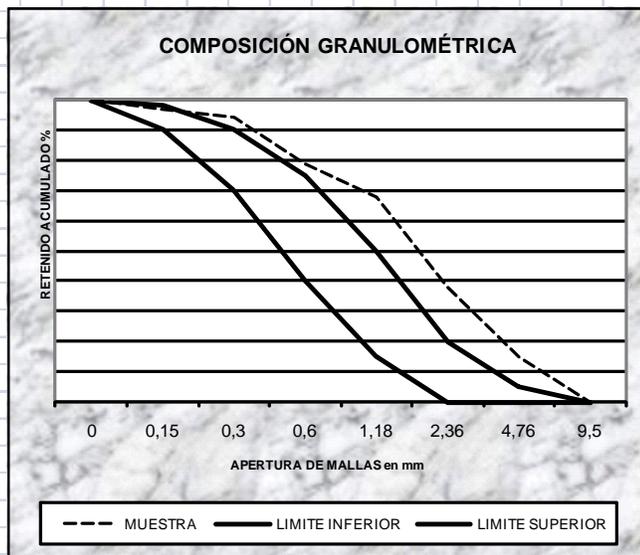
ESTE DOCUMENTO SOLO PUEDE SER REPRODUCIDO EN SU TOTALIDAD
ESTE INFORME SOLO CORRESPONDE A LAS MUESTRAS ENSAYADAS

ESTUDIO DE CALIDAD DE ARENA PARA CONCRETO

LIEC-LAB-10

FECHA DE INFORME	2008-05-19	CLAVE DE OBRA	AD-48
CLIENTE	ING. SERGIO VALDES CONSTANTINO	OBRA	MATERIAL ENVIADO A LABORATORIO
PROCEDENCIA	BCO. MINA II ZAPOTITLAN	FECHA DE MUESTREO	2008-05-15
DESCRIPCIÓN	ARENA DE TEZONTLE	INFORME No.	LIEC.006.08
CON ATENCIÓN A:	ING. SERGIO VALDES		

TABLA DE RESULTADOS		
PROPIEDAD	VALOR	ESPECIFICACIÓN
MASA VOL. SECA SUELTA kg/m ³	952	
MASA VOL. SECA VARILLADA kg/m ³	1047	
DENSIDAD	2,11	2,00 MÍN.
ABSORCIÓN %	5,97	6,00 MÁX.
PASA MALLA 200 (LAVADO) %	3,2	15,0 MÁX
MATERIA ORGANICA	PASA	DEBE PASAR
MODULO DE FINURA	3,76	2,4 - 3,1



COMPOSICION GRANULOMETRICA			
TABLA DE DATOS			
0,0	100	100	100
0,15	97	90	98
0,30	94	70	90
0,60	79	40	75
1,18	68	15	50
2,36	38	0	20
4,76	15	0	5
9,50	0	0	0

OBSERVACIONES

ANALISIS INFORMATIVO - SE ESPECIFICAN PARAMETROS SUGERIDOS EN NMX-C-111-ONNCC (AGREGADOS PARA CONCRETO)

FORMULO:

FIRMA CLIENTE

ANTONIO VALDES JIMENEZ
GERENTE GENERAL

ESTE DOCUMENTO SOLO PUEDE SER REPRODUCIDO EN SU TOTALIDAD
ESTE INFORME SOLO CORRESPONDE A LAS MUESTRAS ENSAYADAS

GRAVAS - RESUMEN DE RESULTADOS

PROPIEDAD	ANDESITA	TEZONTLE	PUMITICA
MASA VOL. SECA SUELTA kg/m ³	1244	952	538
MASA VOL. SECA VARILLADA kg/m ³	1385	1047	596
DENSIDAD	2,34	2,17	0,75
ABSORCIÓN %	4,55	4,57	33,20
PASA MALLA 200 (LAVADO) %	0	0	0,34
MATERIA ORGANICA	PASA	PASA	PASA
DESGASTE LOS ANGELES %	29,5	25,1	30,3
INTEMPERISMO EN NaSO ₄ %	8,9	8,2	24,9

ARENAS - RESUMEN DE RESULTADOS

PROPIEDAD	DE MINA	TEZONTLE	PUMITICA
MASA VOL. SECA SUELTA kg/m ³	1195	952	648
MASA VOL. SECA VARILLADA kg/m ³	1398	1047	711
DENSIDAD	2,29	2,11	0,78
ABSORCIÓN %	3,85	5,97	34,80
PASA MALLA 200 (LAVADO) %	14,1	3,2	10,2
MATERIA ORGANICA	PASA	PASA	PASA
MODULO DE FINURA	2,81	3,76	3,37

ENSAYE FÍSICO DE CEMENTO PORTLAND Y ESTUDIO DE CALIDAD DE AGUA PARA CONCRETO

LIEC-LAB-11

FECHA DE INFORME	2008-05-22	CLAVE DE OBRA	AD-48
CLIENTE	ING. SERGIO VALDES CONSTANTINO	OBRA	MATERIAL ENVIADO A LABORATORIO
PROCEDENCIA	LA PROVIDENCIA	FECHA DE MUESTREO	2008-05-19
DESCRIPCIÓN	CEMENTO CPC-30 (TOLTECA) Y AGUA DE RED	INFORME No.	LIEC.007-008.08
CON ATENCIÓN A:	ING. SERGIO VALDES		

TABLA DE RESULTADOS - CEMENTO		
PROPIEDAD	VALOR	ESPECIFICACIÓN
FINURA (METODO TURBIDIMETRICO cm ² /g)	1800,0	1600 MÍN.
SANIDAD (EXPANSIÓN MÁXIMA) %	0,72	0,80 MAX.
TIEMPO DE FRAGUADO INICIAL minutos	75	60 MIN.
TIEMPO DE FRAGUADO FINAL horas	7,2	10,0 MAX.
RESISTENCIA A COMPRESIÓN 24 horas	156	85 MIN.
RESISTENCIA A COMPRESIÓN 72 horas	212	150 MIN.
DENSIDAD	3,11	

METODOS DE PRUEBA EMPLEADOS: NMX-C-175, NMX-C-83, NMX-C-170

TABLA DE RESULTADOS - AGUA		
PROPIEDAD	VALOR	ESPECIFICACIÓN
COLOR UNIDADES PT-CO	0,0	1,0 MAX.
TURBIEDAD UNIDADES INT	0,0	1,0 MAX.
OLOR	NINGUNO	
PH	8,4	7 - 9
SEDIMENTO	NINGUNO	
CONDUCTIVIDAD ESPECÍFICA microhms	600	
SULFATOS COMO SO ₄ =	150	300 ppm MAX.
CLORUROS COMO Cl ⁻	90	150 ppm MAX.
MAGNESIO COMO MgO=	40	150 ppm MAX.
SOLIDOS TOTALES EN SOLUCIÓN	400	1500 ppm MAX.
MATERIA ORGANICA	0	10 ppm MAX.

METODOS DE PRUEBA EMPLEADOS: NMX-C-277, NMX-C-283

OBSERVACIONES

ANÁLISIS INFORMATIVO - SE ESPECIFICAN PARÁMETROS SUGERIDOS PARA
CEMENTO CPC-30 Y EN NMX-C-122 (AGUA PARA CONCRETO)

FORMULO:

FIRMA CLIENTE

ANTONIO VALDES JIMENEZ
GERENTE GENERAL

ESTE DOCUMENTO SOLO PUEDE SER REPRODUCIDO EN SU TOTALIDAD
ESTE INFORME SOLO CORRESPONDE A LAS MUESTRAS ENSAYADAS

RESISTENCIA A COMPRESION CUBOS DE AZUFRE

LIEC-RT-05

FOLIO N° 001

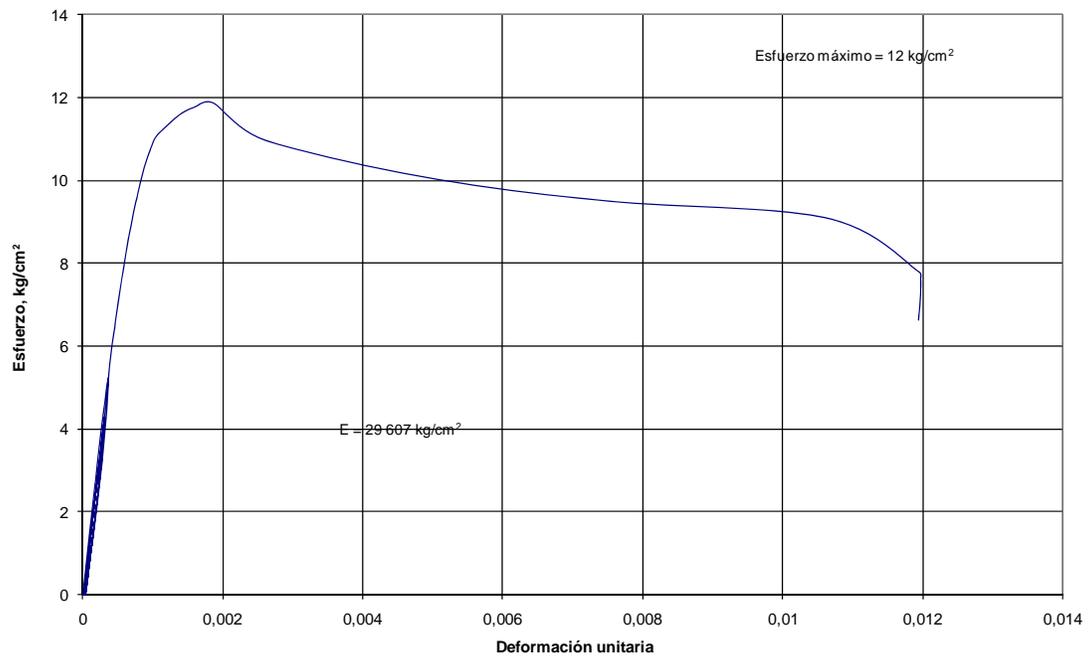
Fecha de Ensaye:	2008/05/27	Lote N°:	AMIC	HORA COLADA	10:30	N° Usos:	1
				HORA ENSAYO	12:35		
N° de cubo	DIMENSIONES en cm		CARGA en kg	AREA en cm²	RESISTENCIA en kg/cm²	OBSERVACIONES	
	LADO 1	LADO 2					
1	5,04	5,05	10500	25,452	413	CUMPLE CON LA RESISTENCIA REQUERIDA EN NM X-C-109-2004	
2	5,05	5,02	10700	25,351	422	CUMPLE CON LA RESISTENCIA REQUERIDA EN NM X-C-109-2004	
3	5,03	5,04	10700	25,351	422	CUMPLE CON LA RESISTENCIA REQUERIDA EN NM X-C-109-2004	
			PROMEDIO	419			
% DE ADITIVO (DIATOMITA)	NA	EDAD DE ENSAYE (horas)	2	TEMPERATURA DEL AZUFRE en °C	130	ESPECIFICACION DE LA RESISTENCIA en kg/cm²	350 MIN.

B. GRÁFICAS MÓDULO DE ELASTICIDAD

Para los tres grupos en estudio se presentan las gráficas de módulo de elasticidad de algunas muestras con el fin de ejemplificar los resultados obtenidos en este trabajo.

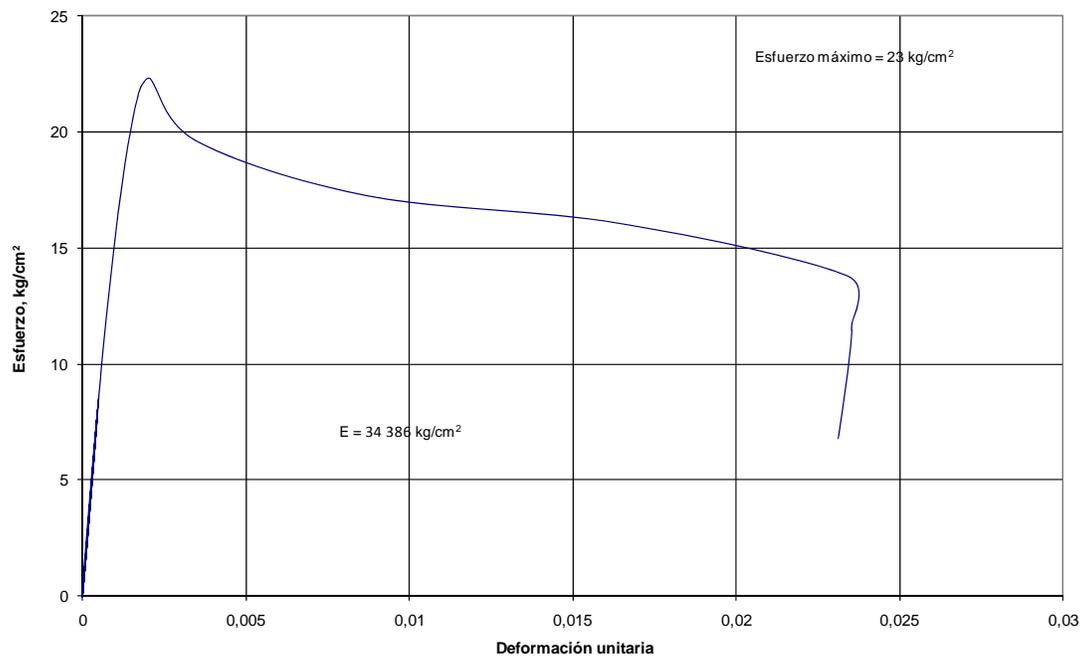
CAL-01-09

CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN AXIAL



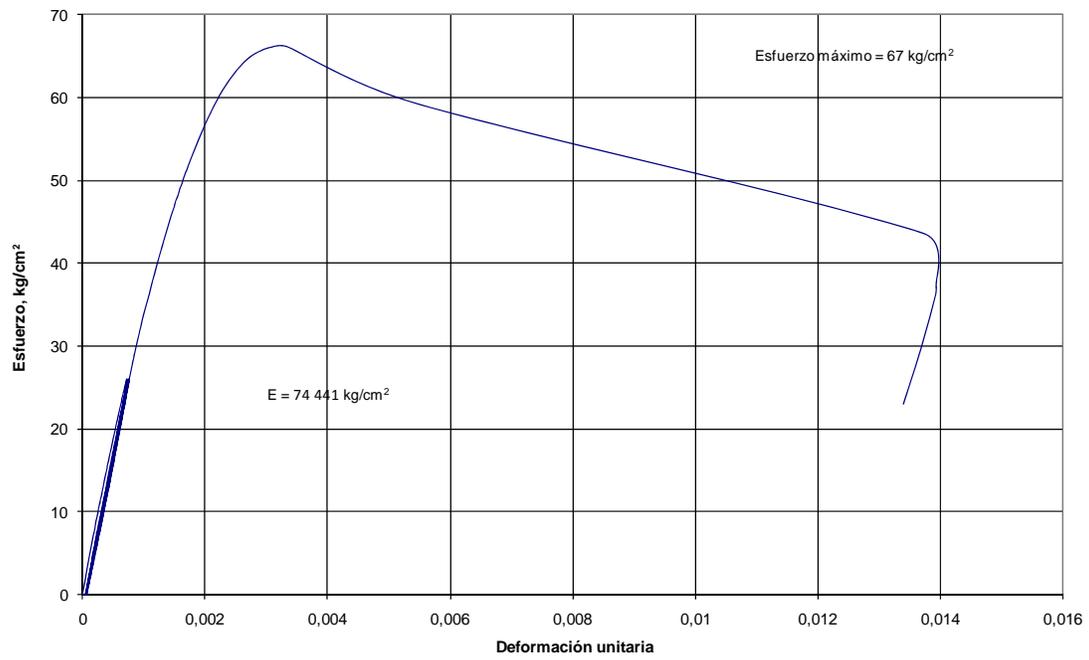
CAL-02-09

CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN AXIAL



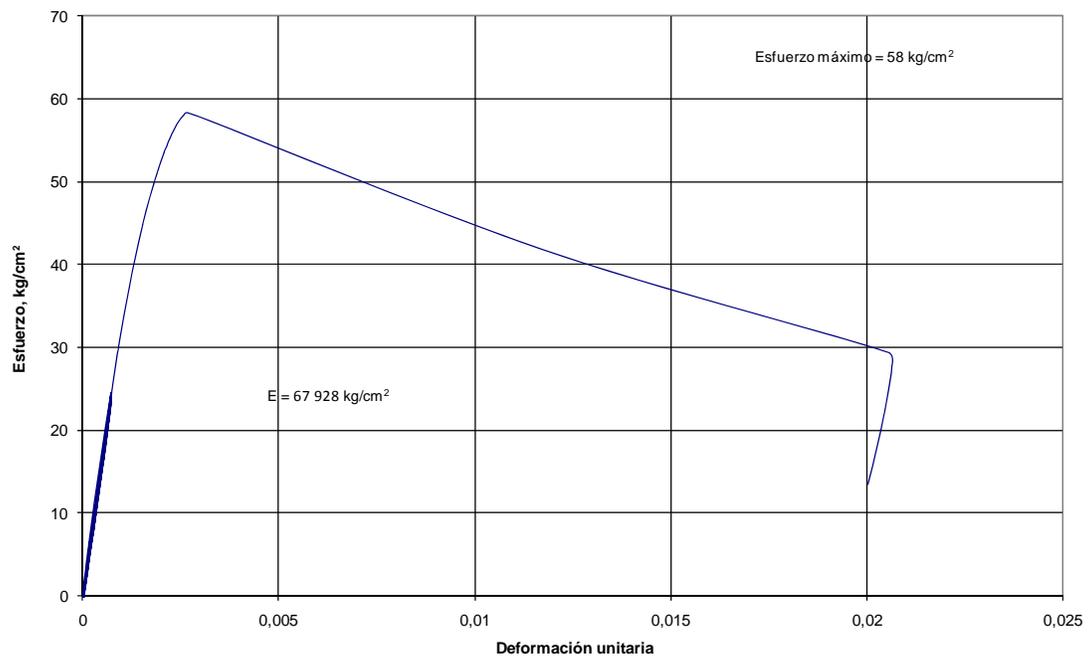
CAL.03-14

CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN AXIAL



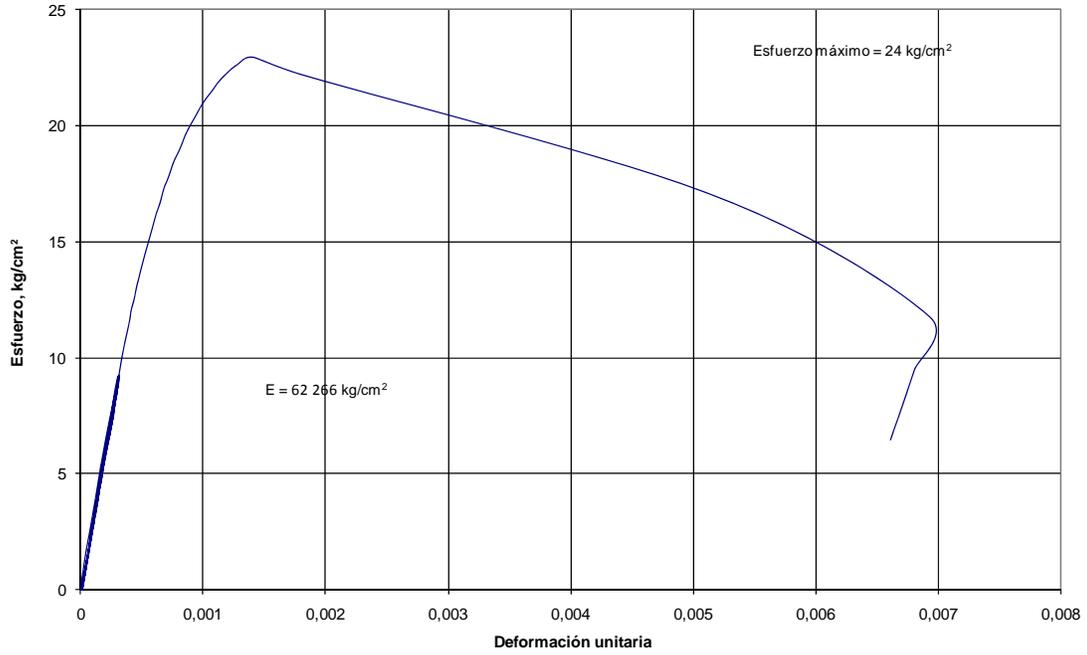
CAL-04-13

CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN AXIAL



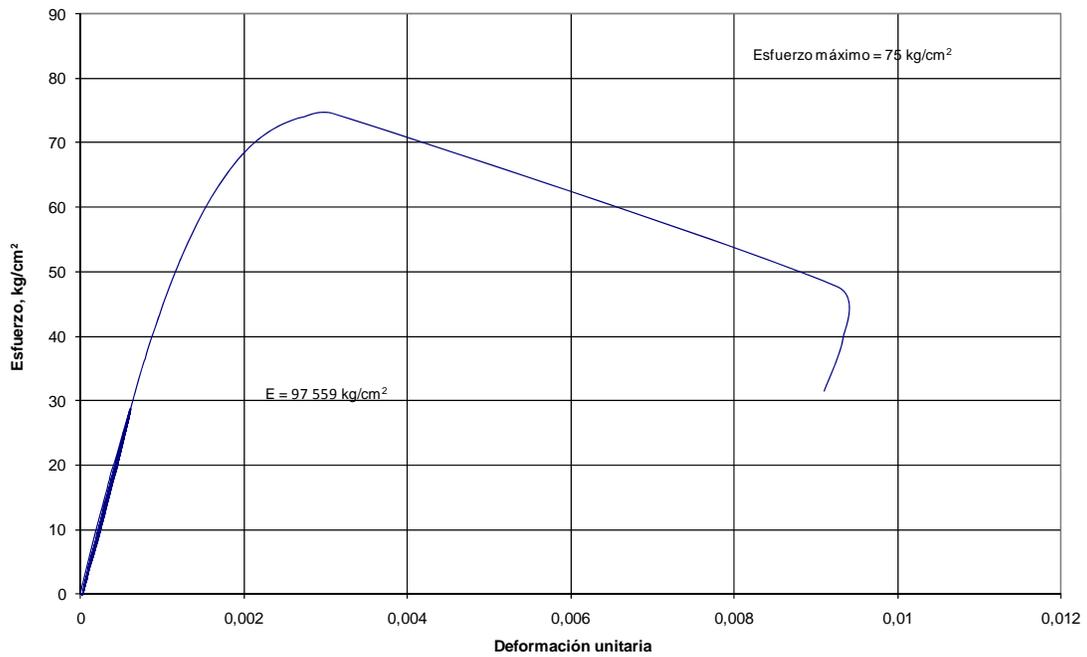
CAL-05-11

CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN AXIAL



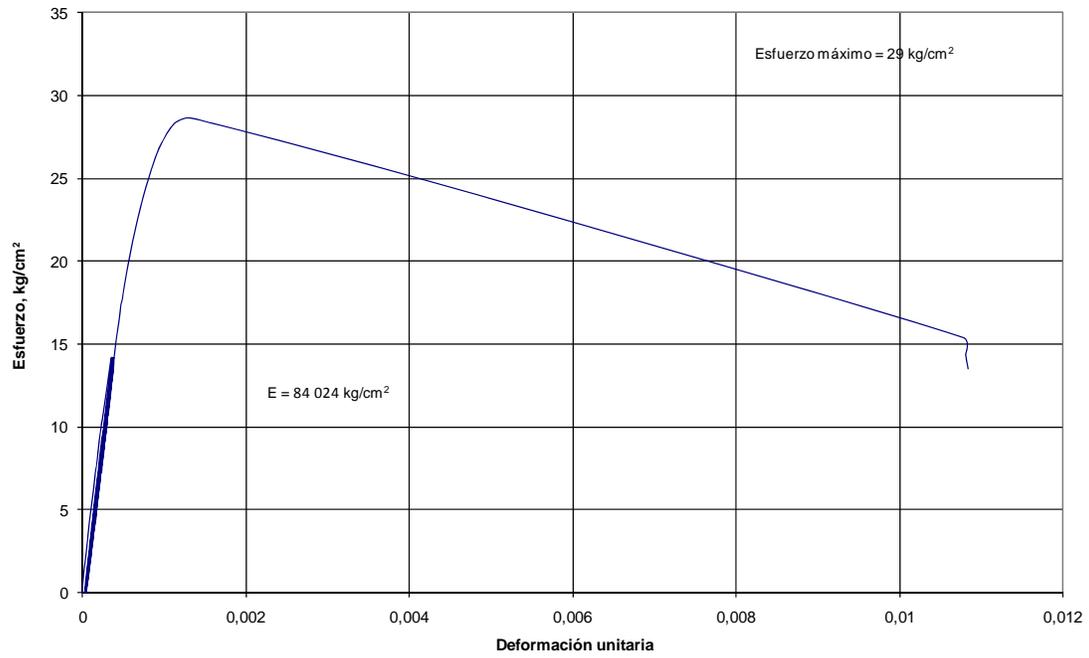
CAL-06-10

CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN AXIAL



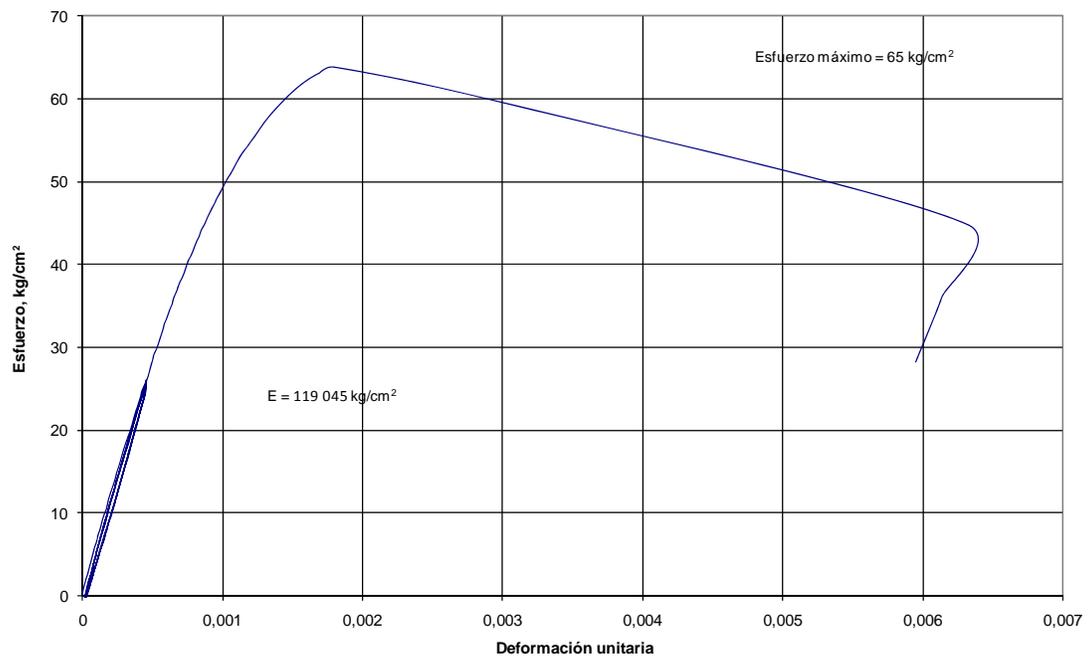
CAL-07-11

CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN AXIAL



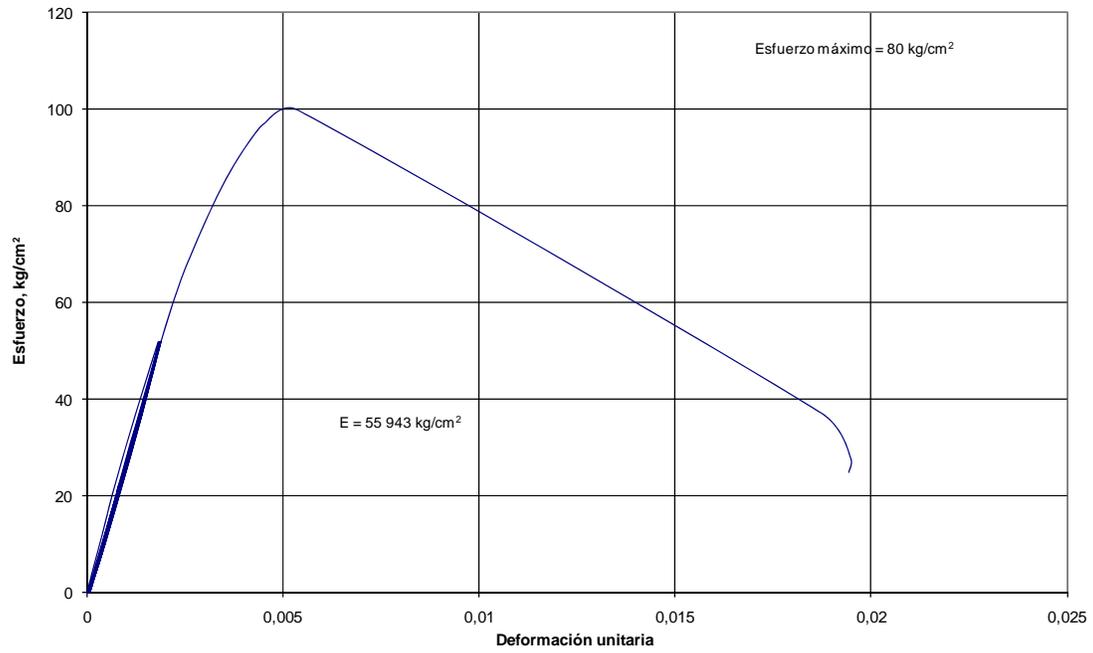
CAL-08-09

CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN AXIAL



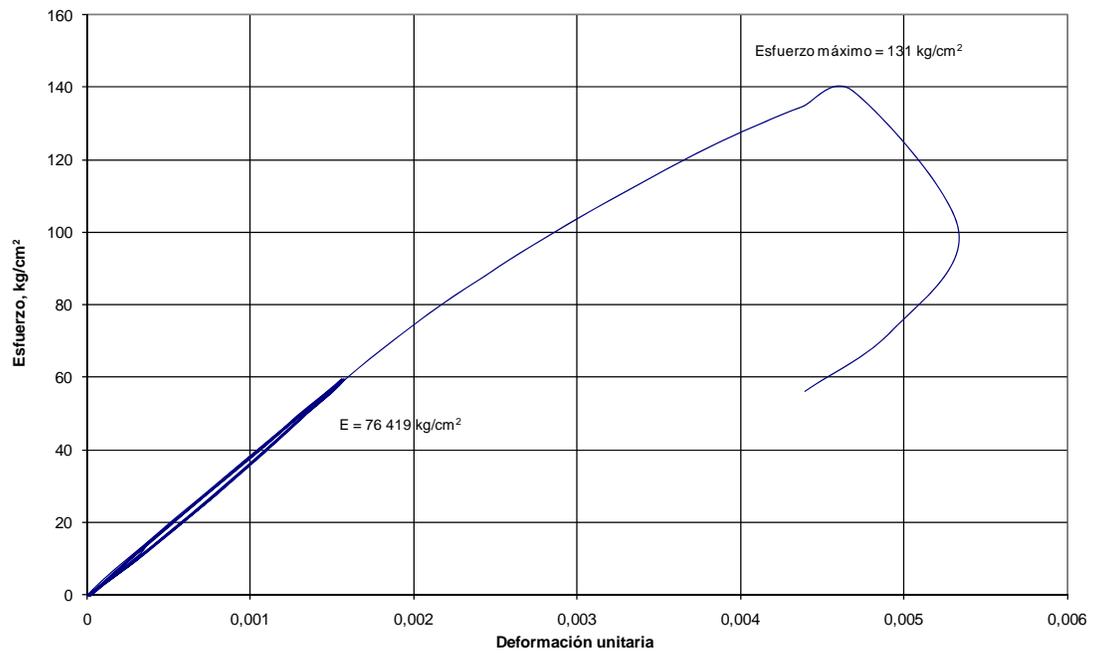
CL-01-05

CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN AXIAL



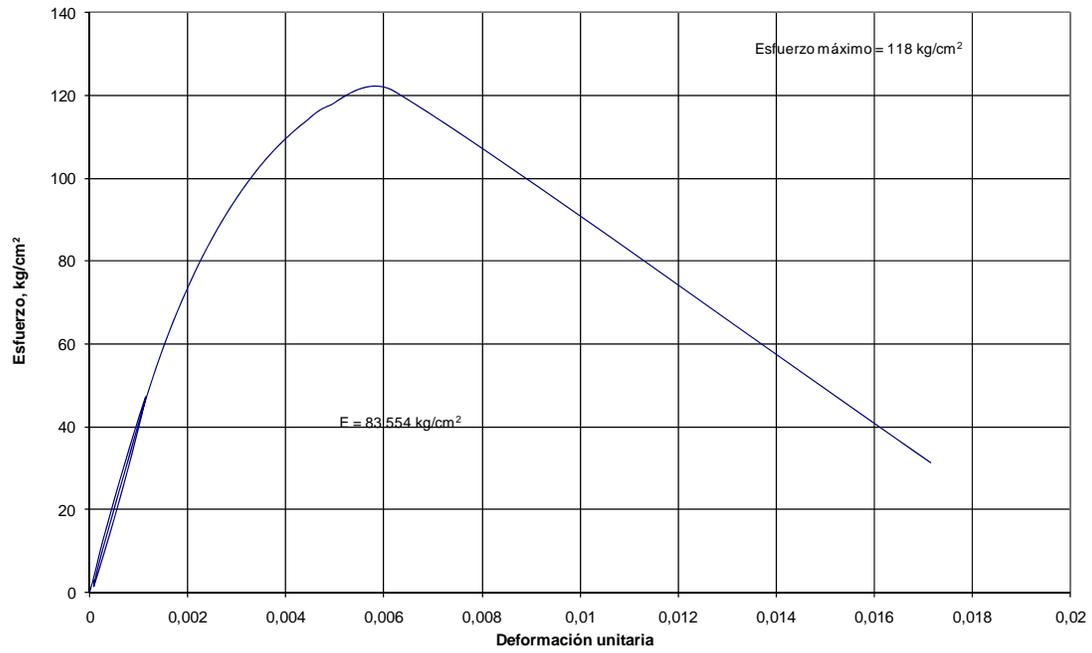
CL-02-06

CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN AXIAL



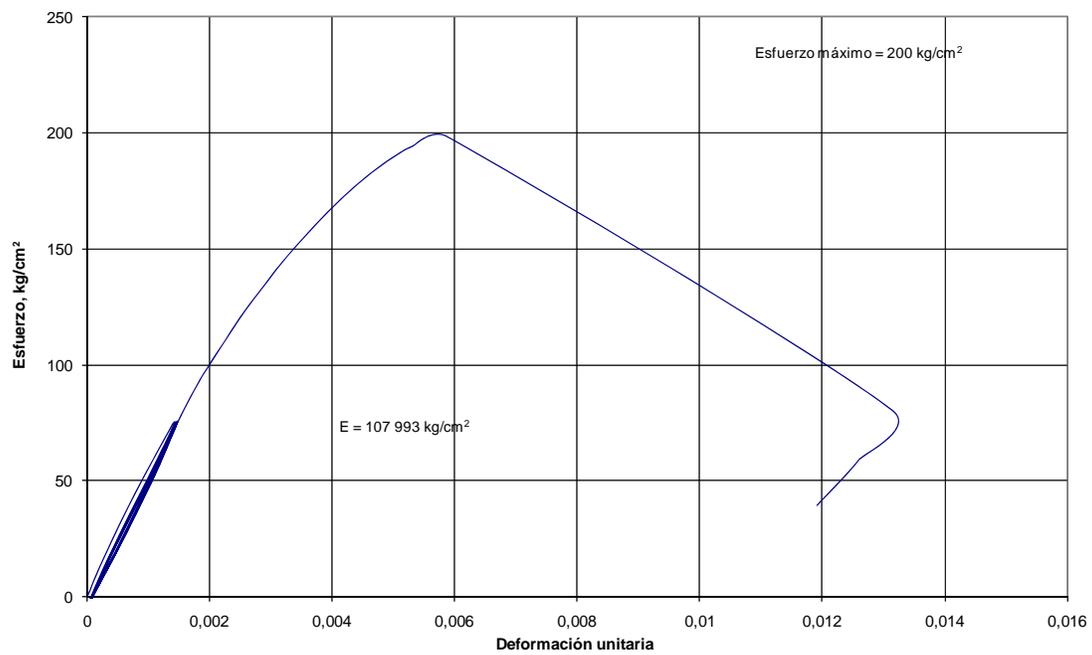
CL-03-07

CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN AXIAL



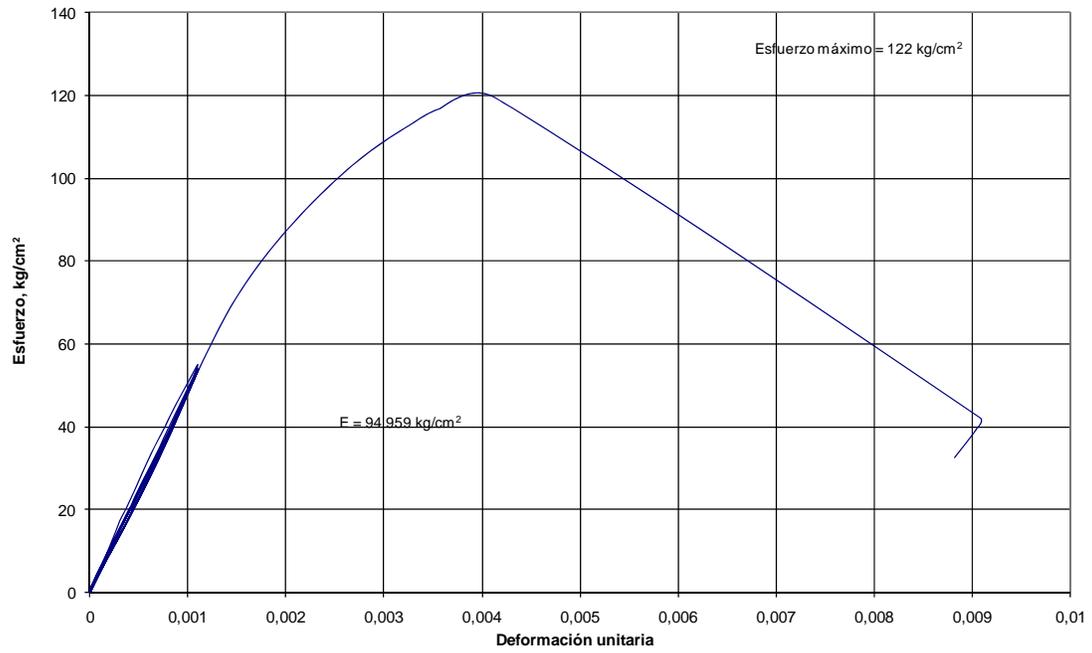
CL-04-05

CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN AXIAL



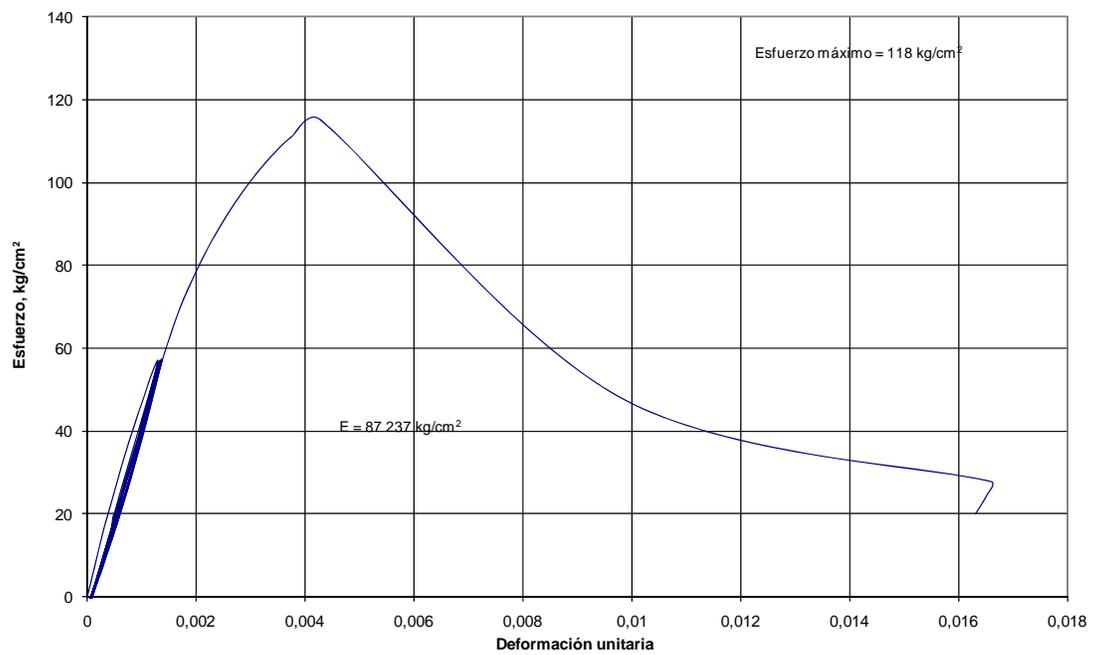
CL-05-05

CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN AXIAL



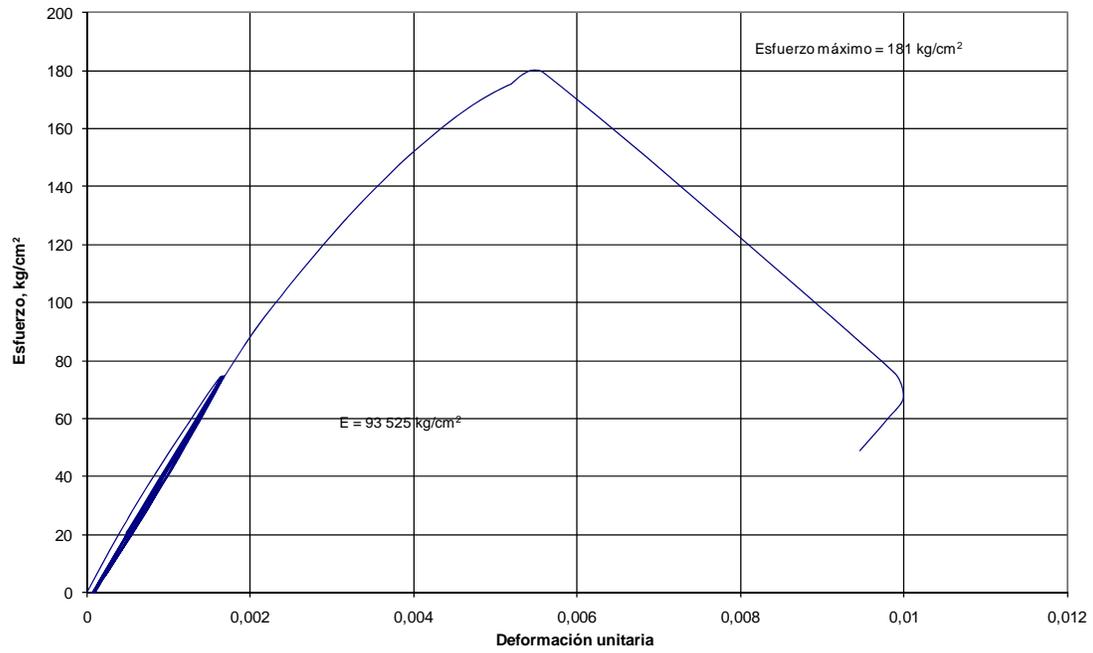
CL-06-05

CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN AXIAL



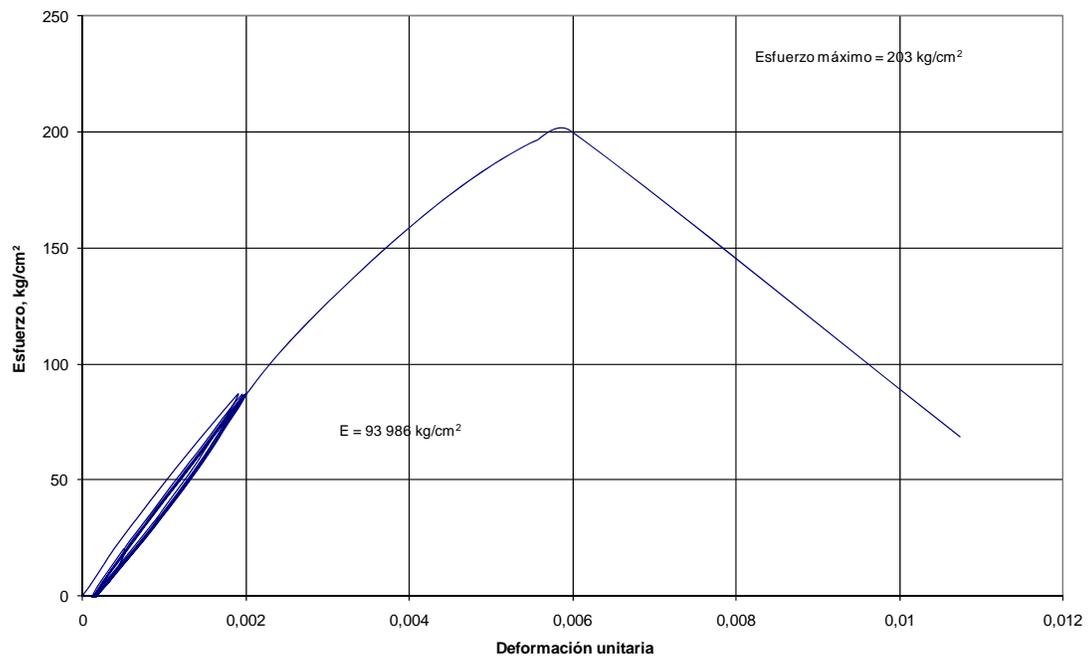
XL-01-09

CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN AXIAL



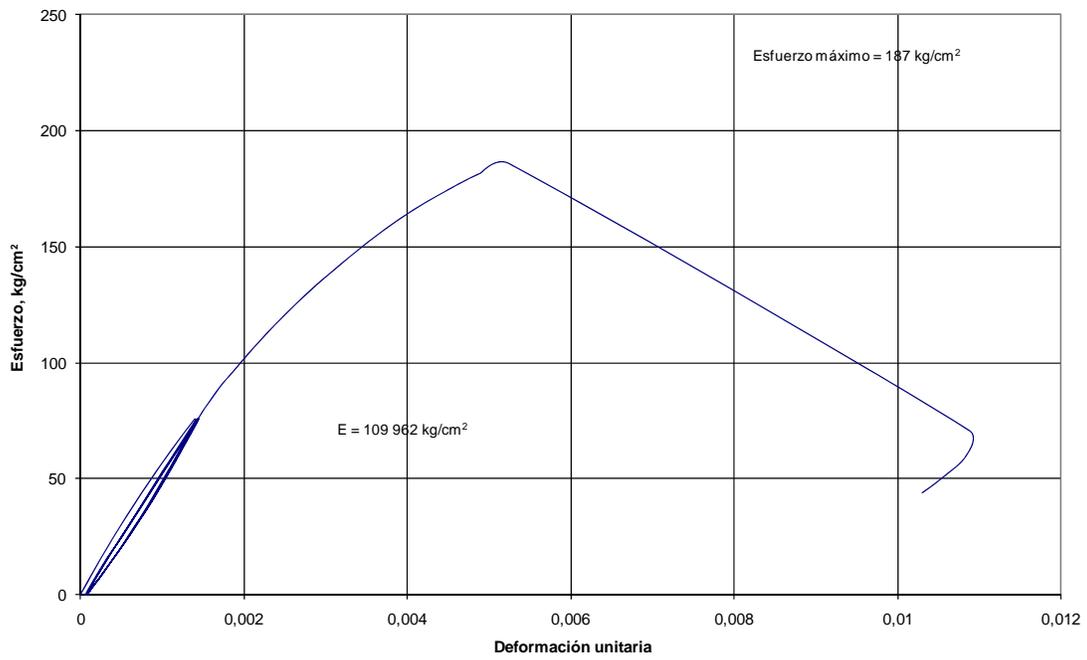
XL-02-09

CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN AXIAL



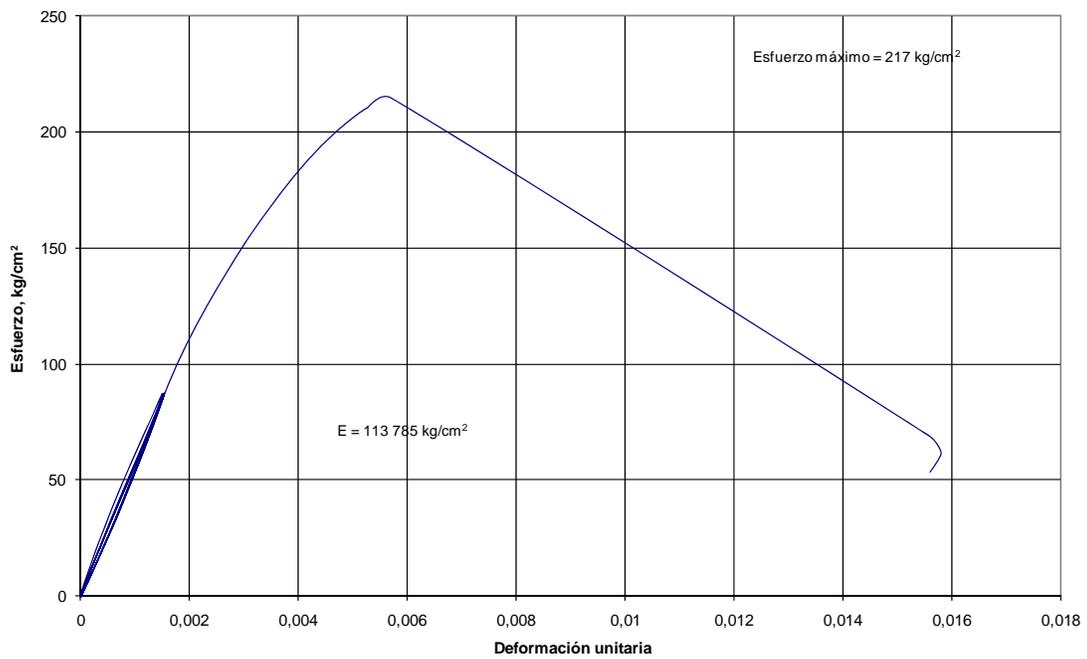
XL-03-06

CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN AXIAL



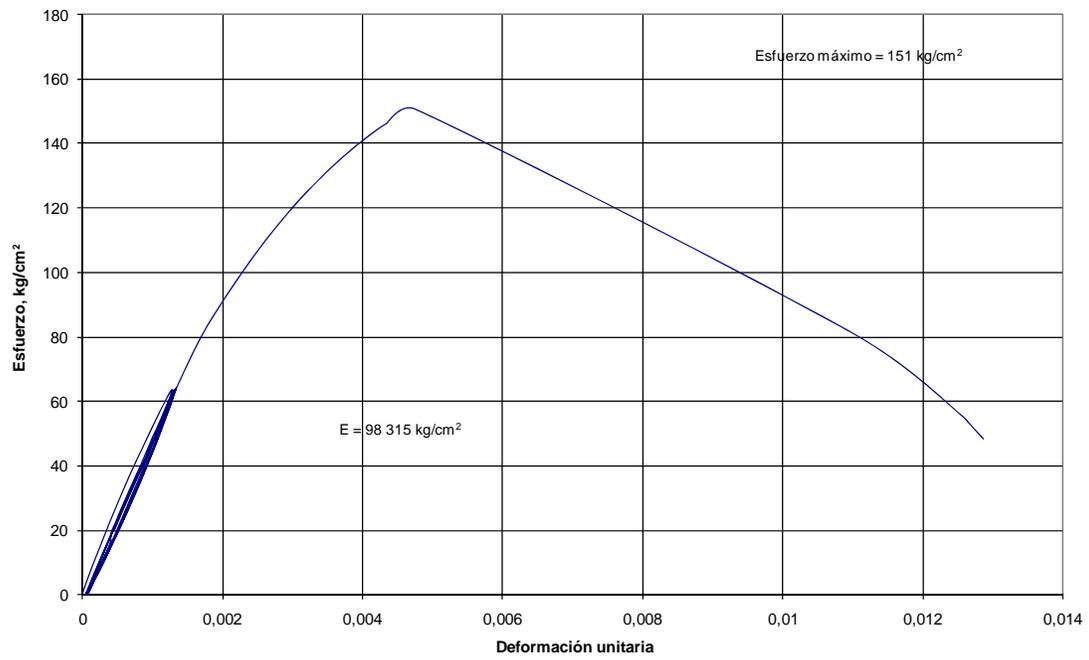
XL-04-07

CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN AXIAL



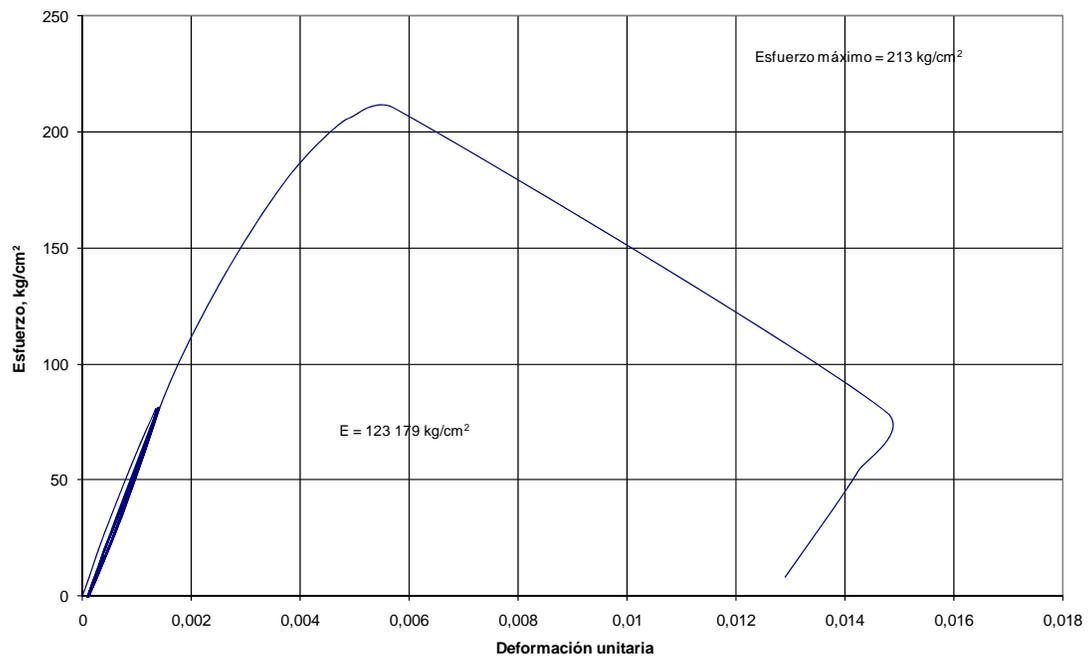
XL-05-03

CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN AXIAL



XL-06-08

CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN AXIAL



C. DISEÑO ESTRUCTURAL DE ELEMENTOS DE CONCRETO

De acuerdo a las combinaciones de carga consideradas y al análisis de los resultados, en este punto se describirán los aspectos más notables obtenidos del diseño estructural.

Enseguida de los títulos se agrega entre paréntesis al caso de diseño que se trata, CN para concreto normal y CL para concreto ligero.

Losa de cimentación (CN)

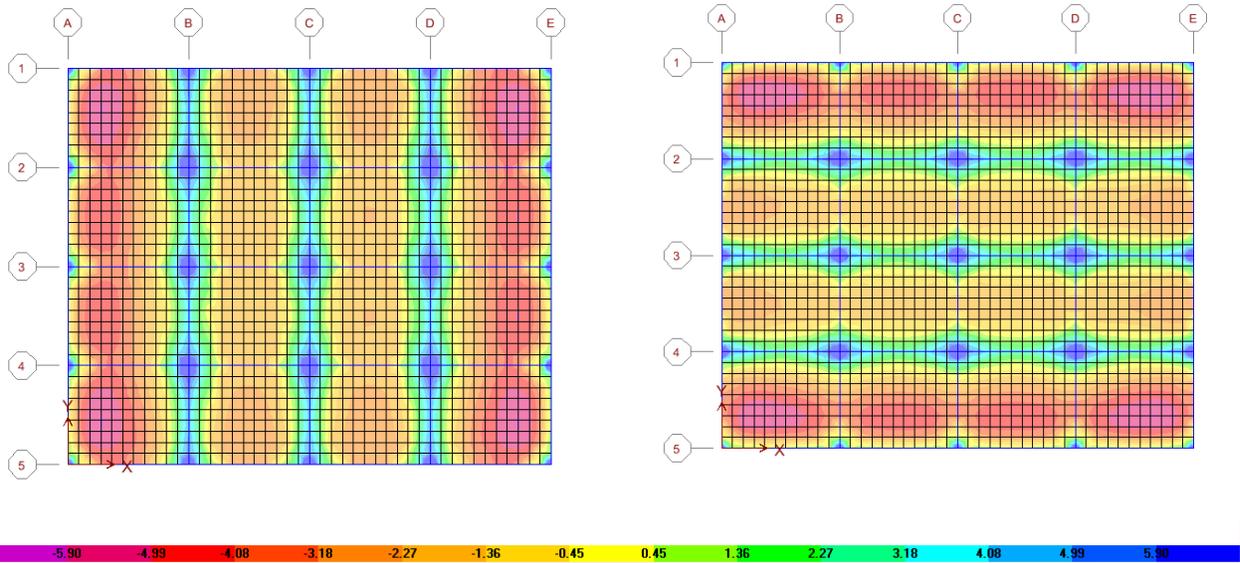


DIAGRAMA DE MOMENTOS UNITARIOS LOSA DE CIMENTACIÓN

VIGA NIVEL LOSA BASE
EJE -

ACERO LONGITUDINAL

EXTREMO $b=$ 100 cm
 $h=$ 20 cm
 $M_{servicio}=$ 3,00 t.m $r=$ 3 cm
 $M_u=$ 4,50 t.m $d=$ 17 cm

Cálculo de constantes

$f'_c=$ 250 kg/cm² $F.R.=$ 0,9
 $f'_c=$ 200 kg/cm² $F.C.=$ 1,5
 $f'_c=$ 170 kg/cm²
 $f_y=$ 4200 kg/cm² $p_b=$ 0,0190
 $\rho_{min}=$ 0,0026 $\rho_{max}=$ 0,0190
 $A_{s_{min}}=$ 4,48 cm² $A_{s_{max}}=$ 32,38 cm²
 $q_{min}=$ 0,0651 $q_{max}=$ 0,4706
 $M_{R_{min}}=$ 2,79 t.m $M_{R_{max}}=$ 15,91 t.m

Revisión de viga simplemente armada

- 1) $M_u > M_{r_{min}}$ **PASA**
- 2) $M_u < M_{r_{max}}$ **PASA**

Cálculo del área de acero necesaria

$A_{s_{necesario}}=$ 7,40 cm²

Cálculo de acero propuesto

La propuesta es adecuada

5 # 5 $M_R=$ 5,90 t.m
 0 # 4
 $A_s=$ 9,90 cm² vars # 5 @ 20 cm

Contratraves (CN)

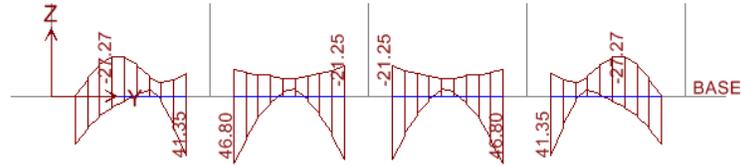


DIAGRAMA DE MOMENTO CONTRATRABE EJES LETRAS

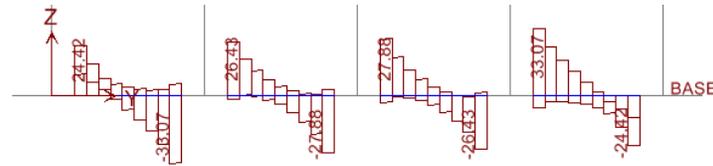


DIAGRAMA DE CORTANTE CONTRATRABE EJES LETRAS

VIGA	NIVEL EJE	LOSA BASE LETRAS	CT-1
------	-----------	------------------	------

ACERO LONGITUDINAL

EXTREMO

$M_{servicio} =$	30,33	t.m	$b =$	25	cm
$M_u =$	45,50	t.m	$h =$	70	cm
			$r =$	3	cm
			$d =$	67	cm

Cálculo de constantes

$f'_c =$	250	kg/cm ²	F.R. =	0,9	
$f_c =$	200	kg/cm ²	F.C. =	1,5	
$f'_c =$	170	kg/cm ²			
$f_y =$	4200	kg/cm ²	$p_b =$	0,0190	
$p_{min} =$	0,0026		$p_{max} =$	0,0190	
$A_{s_{min}} =$	4,41	cm ²	$A_{s_{max}} =$	31,90	cm ²
$q_{min} =$	0,0651		$q_{max} =$	0,4706	
$M_{R_{min}} =$	10,82	t.m	$M_{R_{max}} =$	61,79	t.m

Revisión de viga simplemente armada

- 1) $M_u > M_{r_{min}}$ **PASA**
- 2) $M_u < M_{r_{max}}$ **PASA**

Cálculo del área de acero necesaria

$A_{s_{necesario}} =$ **21,32** cm²

Cálculo de acero propuesto

La propuesta es adecuada

2	#	8	$M_R =$	43,66	t.m
2	#	8			
$A_s =$	20,27	cm ²			

VIGA NIVEL LOSA BASE CT-2
EJE NÚMEROS

ACERO LONGITUDINAL

EXTREMO b= 25 cm
h= 70 cm
M_{servicio}= 35,33 t.m r= 3 cm
Mu= 53,00 t.m d= 67 cm

Cálculo de constantes

f'c= 250 kg/cm² F.R.= 0,9
f*c= 200 kg/cm² F.C.= 1,5
f" c= 170 kg/cm²
fy= 4200 kg/cm² pb= 0,0190
p_{min}= 0,0026 p_{max}= 0,0190
As_{min}= 4,41 cm² As_{max}= 31,90 cm²
q_{min}= 0,0651 q_{max}= 0,4706
M_{Rmin}= 10,82 t.m M_{Rmax}= 61,79 t.m

Revisión de viga simplemente armada

- 1) Mu > Mr_{min} PASA
2) Mu < Mr_{max} PASA

Cálculo del área de acero necesaria

As_{necesario}= 25,86 cm²

Cálculo de acero propuesto

3 # 8
2 # 8
As= 25,34 cm²

La propuesta es adecuada

Mr= 52,18 t.m

VIGA NIVEL LOSA BASE
EJE NÚMEROS

ACERO TRANSVERSAL

V_{servicio}= 26,67 t L= 700 cm
Vu= 40,00 t F.R.= 0,8
F.C.= 1,5

Requisitos generales

- a) h <= 70 cm CUMPLE
b) h/b <= 6 CUMPLE
c) L/h >= 5 CUMPLE

Cálculo del cortante resistente

P_{tensión}= 0,0154 Estribos # 3
V_{CR}= 9475 kg a_s= 0,71 cm²
V_{SR}= 32082 kg A_v= 1,43 cm²
s= 10,51 cm
V_R= 41,56 t

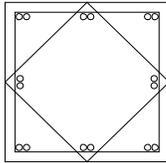
- 1) Vu < 1.5 F.R bd (f*c)^0.5= 28426 kg NO CUMPLE
2) Vu < 2.5 F.R bd (f*c)^0.5= 47376 kg CUMPLE

La propuesta es correcta

Estribos # 3 @ 10,0 cm

Columnas (CN)

Se presenta el diagrama de interacción de la columna de concreto así como su revisión para los elementos mecánicos más desfavorables.



16#8
2E#3@20
p=1,9%

COLUMNA C-1

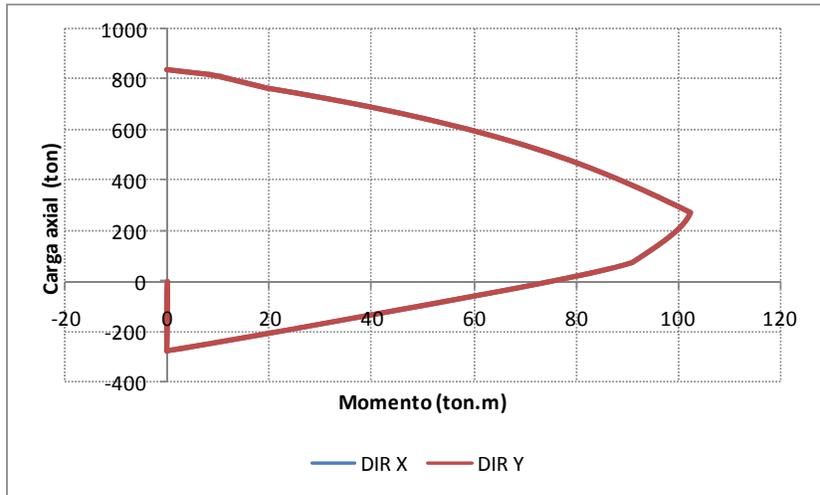


DIAGRAMA DE INTERACCIÓN

RESUMEN DE DATOS:

LA BASE ES:	65,000	cm
LA ALTURA ES:	65,000	cm
EL RECUB, ES:	5,000	cm
EL f _c ES:	250,000	Kg/cm ²
EL f _y ES:	4200,000	Kg/cm ²
EL P _u ES:	75,700	Ton
EL M _{ux} ES:	72,800	Ton*m
EL M _{uy} ES:	22,100	Ton*m
LA e _x ES:	,292	m
LA e _y ES:	,962	m

RESUMEN DE RESULTADOS:

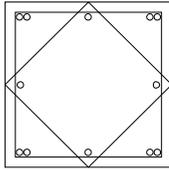
PR ₀ (Ton)	PR _x (Ton)	MR _x (Ton*m)	PR _y (Ton)	MR _y (Ton*m)
835,937	95,604	92,707	330,981	96,561

$$PR = 1 / (1/PR_x + 1/PR_y - 1/PR_0) = 81,401 \text{ Ton}$$

$$PR/PR_0 = ,097$$

$$M_{ux}/M_{rx} + M_{uy}/M_{ry} = 1,014$$

Por lo tanto, la sección es adecuada.



12#8
2E#3@20
p=1,4%

COLUMNA C-2

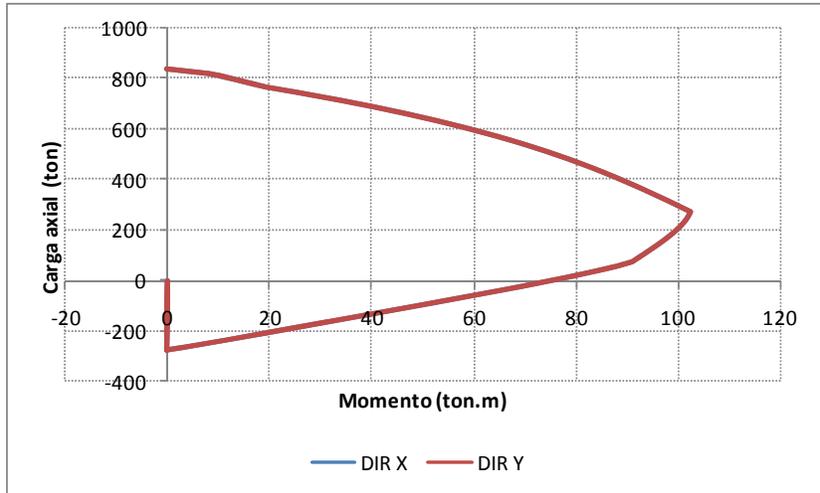


DIAGRAMA DE INTERACCIÓN

RESUMEN DE DATOS:

LA BASE ES:	65,000	cm
LA ALTURA ES:	65,000	cm
EL RECUB, ES:	5,000	cm
EL f _c ES:	250,000	Kg/cm ²
EL f _y ES:	4200,000	Kg/cm ²
EL P _u ES:	16,700	Ton
EL M _{ux} ES:	27,100	Ton*m
EL M _{uy} ES:	42,800	Ton*m
LA e _x ES:	2,563	m
LA e _y ES:	1,623	m

RESUMEN DE RESULTADOS:

PR0 (Ton)	PRx (Ton)	MRx (Ton*m)	PRy (Ton)	MRy (Ton*m)
770,748	41,196	67,478	24,168	63,269

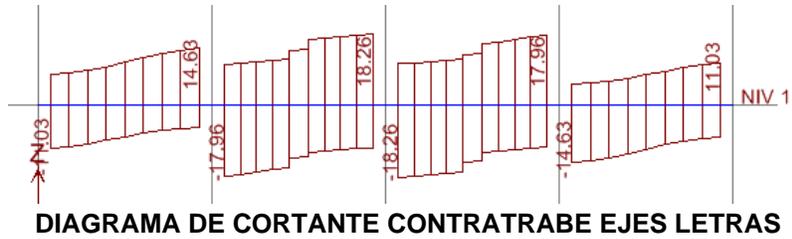
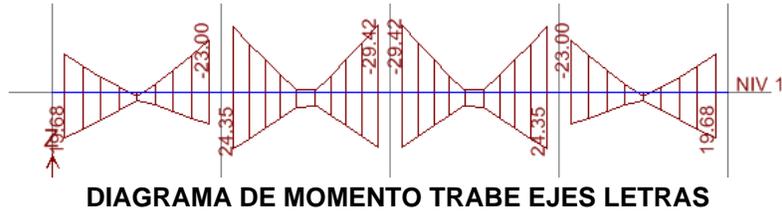
$PR = 1 / (1/PRx + 1/PRy - 1/PR0) = 15,539 \text{ Ton}$

$PR/PR0 = ,020$

$Mux/Mrx + Muy/Mry = 1,078$

Por lo tanto, la sección es adecuada.

Trabes (CN)



VIGA NIVEL EJE 1 LETRAS T-1

ACERO LONGITUDINAL

EXTREMO

$M_{servicio} = 20,00$ t.m $b = 20$ cm
 $M_u = 30,00$ t.m $h = 60$ cm
 $r = 3$ cm
 $d = 57$ cm

Cálculo de constantes

$f'_c = 250$ kg/cm² $F.R. = 0,9$
 $f^*_c = 200$ kg/cm² $F.C. = 1,5$
 $f''_c = 170$ kg/cm²
 $f_y = 4200$ kg/cm² $pb = 0,0190$
 $p_{min} = 0,0026$ $p_{máx} = 0,0190$
 $A_{s_{min}} = 3,00$ cm² $A_{s_{máx}} = 21,71$ cm²
 $q_{min} = 0,0651$ $q_{máx} = 0,4706$
 $M_{R_{min}} = 6,26$ t.m $M_{R_{máx}} = 35,78$ t.m

Revisión de viga simplemente armada

- 1) $M_u > M_{r_{min}}$ PASA
- 2) $M_u < M_{r_{máx}}$ PASA

Cálculo del área de acero necesaria

$A_{s_{necesario}} = 17,09$ cm²

Cálculo de acero propuesto

La propuesta es adecuada

3 # 6 $M_R = 30,02$ t.m
 3 # 6
 $A_s = 17,10$ cm²

VIGA NIVEL 1
EJE LETRAS

ACERO TRANSVERSAL

$V_{servicio} = 12,67$ t $L = 700$ cm
 $V_u = 19,00$ t F.R. = 0,8
 F.C. = 1,5

Requisitos generales

- a) $h \leq 70$ cm CUMPLE
- b) $h/b \leq 6$ CUMPLE
- c) $L/h \geq 5$ CUMPLE

Cálculo del cortante resistente

$P_{tension} = 0,0150$ Estribos # **3**
 $V_{CR} = 6449$ kg $a_s = 0,71$ cm²
 $V_{SR} = 13647$ kg $A_v = 1,43$ cm²
 $V_R = 20,10$ t $s = 21,75$ cm

- 1) $V_u < 1.5 F.R. b d (f^*c)^{0.5} = 19346$ kg CUMPLE
- 2) $V_u < 2.5 F.R. b d (f^*c)^{0.5} = 32244$ kg CUMPLE

La propuesta es correcta

Estribos # 3 @ 20,0 cm

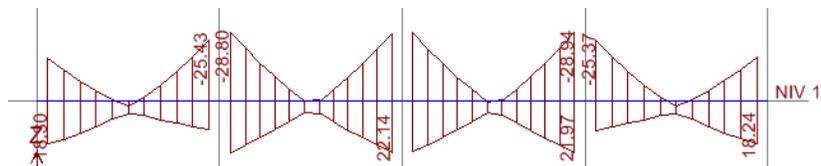


DIAGRAMA DE MOMENTO CONTRATRABE EJES NÚMEROS

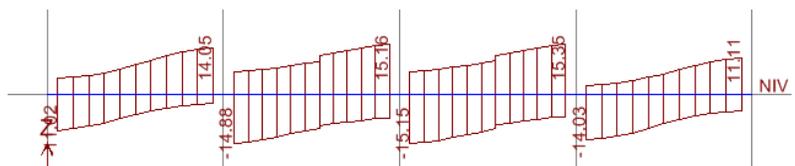


DIAGRAMA DE CORTANTE CONTRATRABE EJES NÚMEROS

VIGA NIVEL 1 T-2
EJE EJE NÚMROS

ACERO LONGITUDINAL

EXTREMO b= 20 cm
h= 60 cm
M_{servicio}= 19,33 t.m r= 3 cm
Mu= 29,00 t.m d= 57 cm

Cálculo de constantes

f'c= 250 kg/cm² F.R.= 0,9
f*c= 200 kg/cm² F.C.= 1,5
f" c= 170 kg/cm²
fy= 4200 kg/cm² pb= 0,0190
p_{min}= 0,0026 p_{máx}= 0,0190
As_{min}= 3,00 cm² As_{máx}= 21,71 cm²
q_{min}= 0,0651 q_{máx}= 0,4706
M_{Rmin}= 6,26 t.m M_{Rmáx}= 35,78 t.m

Revisión de viga simplemente armada

- 1) Mu > Mr_{min} PASA
- 2) Mu < Mr_{máx} PASA

Cálculo del área de acero necesaria

As_{necesario}= 16,36 cm²

Cálculo de acero propuesto

La propuesta es adecuada

3 # 6 M_R= 30,02 t.m
3 # 6
As= 17,10 cm²

VIGA NIVEL 1
EJE EJE NÚMROS

ACERO TRANSVERSAL

V_{servicio}= 10,67 t L= 700 cm
Vu= 16,00 t F.R.= 0,8
F.C.= 1,5

Requisitos generales

- a) h <= 70 cm CUMPLE
- b) h/b <= 6 CUMPLE
- c) L/h >= 5 CUMPLE

Cálculo del cortante resistente

P_{tensión}= 0,0144 Estribos # 3
V_{CR}= 6449 kg a_s= 0,71 cm²
V_{SR}= 10918 kg A_v= 1,43 cm²
s= 28,50 cm
V_R= 17,37 t

- 1) Vu < 1.5 F.R bd (f*c)^{0.5}= 19346 kg CUMPLE
- 2) Vu < 2.5 F.R bd (f*c)^{0.5}= 32244 kg CUMPLE

La propuesta es correcta

Estribos # 3 @ 25,0 cm

Losa de cimentación (CL)

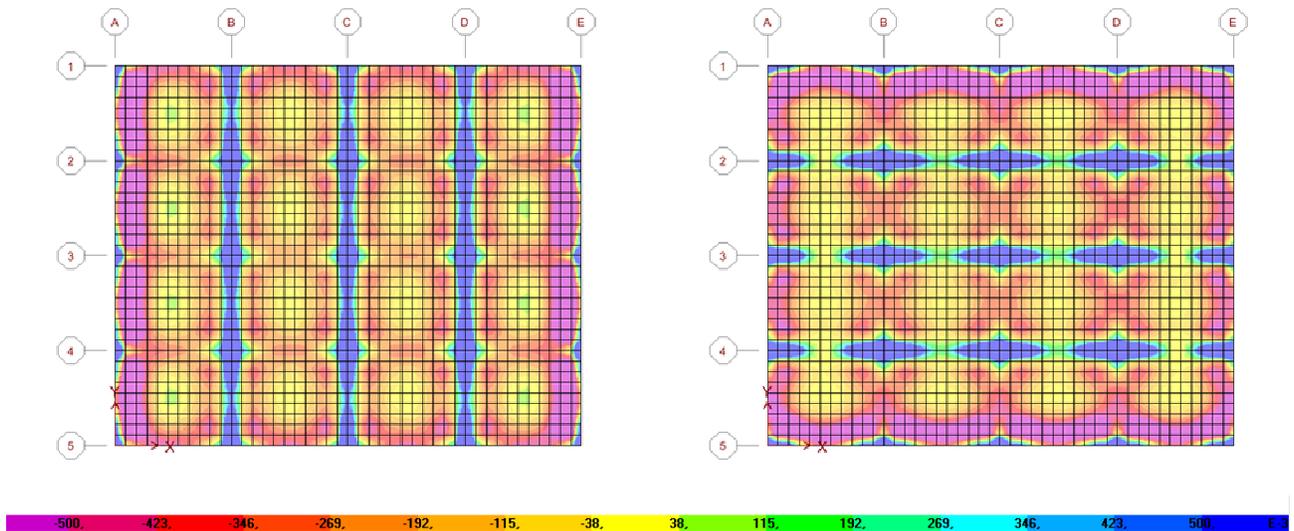


DIAGRAMA DE MOMENTOS UNITARIOS LOSA DE CIMENTACIÓN

VIGA NIVEL LOSA BASE
EJE -

ACERO LONGITUDINAL

EXTREMO $b=$ 100 cm
 $h=$ 20 cm
 $r=$ 3 cm
 $d=$ 17 cm
 $M_{servicio}=$ 3,00 t.m
 $M_u=$ 4,50 t.m

Cálculo de constantes

$f'_c=$ 250 kg/cm² F.R.= 0,9
 $f^*_c=$ 200 kg/cm² F.C.= 1,5
 $f''_c=$ 170 kg/cm²
 $f_y=$ 4200 kg/cm² $pb=$ 0,0190
 $p_{min}=$ 0,0026 $p_{max}=$ 0,0190
 $AS_{min}=$ 4,48 cm² $AS_{max}=$ 32,38 cm²
 $q_{min}=$ 0,0651 $q_{max}=$ 0,4706
 $M_{Rmin}=$ 2,79 t.m $M_{Rmax}=$ 15,91 t.m

Revisión de viga simplemente armada

- 1) $M_u > M_{Rmin}$ PASA
- 2) $M_u < M_{Rmax}$ PASA

Cálculo del área de acero necesaria

$AS_{necesario}=$ 7,40 cm²

Cálculo de acero propuesto

La propuesta es adecuada

$M_R=$ 5,90 t.m
 $As=$ 9,90 cm² vars # 5 @ 20 cm

Contratraves (CL)

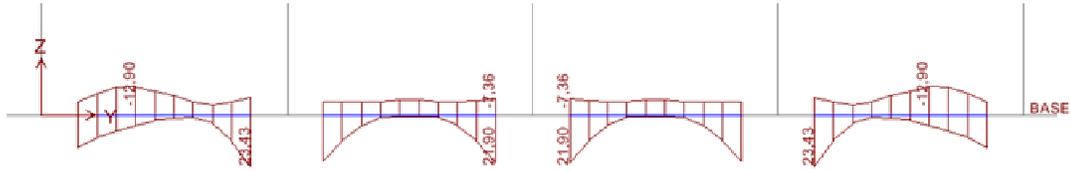


DIAGRAMA DE MOMENTO CONTRATRABE EJES LETRAS

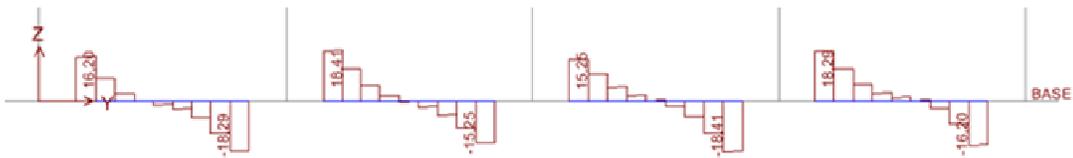
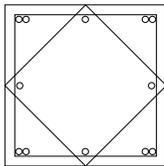


DIAGRAMA DE CORTANTE CONTRATRABE EJES LETRAS

VIGA	NIVEL EJE	LOSA BASE LETRAS	CT-1
ACERO LONGITUDINAL			
EXTREMO			b= 25 cm
			h= 60 cm
$M_{servicio} =$	16,00	t.m	r= 3 cm
$M_u =$	24,00	t.m	d= 57 cm
Cálculo de constantes			
$f'c =$	250	kg/cm ²	F.R.= 0,9
$f^*c =$	200	kg/cm ²	F.C.= 1,5
$f''c =$	170	kg/cm ²	
$f_y =$	4200	kg/cm ²	pb= 0,0190
$p_{min} =$	0,0026		$p_{máx} =$ 0,0190
$A_{s_{min}} =$	3,76	cm ²	$A_{s_{máx}} =$ 27,14 cm ²
$q_{min} =$	0,0651		$q_{máx} =$ 0,4706
$M_{Rmin} =$	7,83	t.m	$M_{Rmáx} =$ 44,72 t.m
Revisión de viga simplemente armada			
1) $M_u > M_{rmin}$		PASA	
2) $M_u < M_{rmáx}$		PASA	
Cálculo del área de acero necesaria			
$A_{s_{necesario}} =$	12,49	cm ²	
Cálculo de acero propuesto La propuesta es adecuada			
3	#	6	$M_R =$ 26,91 t.m
2	#	6	
$A_s =$	14,25	cm ²	

Columnas (CN)

Se presenta el diagrama de interacción de la columna de concreto así como su revisión para los elementos mecánicos más desfavorables.



8#8 + 4#6

2E#3@20

p=2,1%

COLUMNA C-1

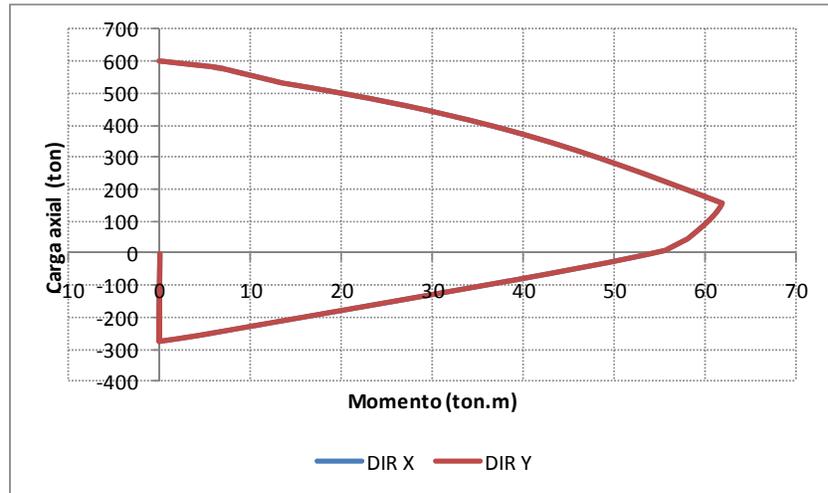


DIAGRAMA DE INTERACCIÓN

RESUMEN DE DATOS:

LA BASE ES:	50,000	cm
LA ALTURA ES:	50,000	cm
EL RECUB. ES:	5,000	cm
EL f_c ES:	250,000	Kg/cm ²
EL f_y ES:	4200,000	Kg/cm ²
EL P_u ES:	84,000	Ton
EL M_{ux} ES:	13,300	Ton*m
EL M_{uy} ES:	44,000	Ton*m
LA e_x ES:	,524	m
LA e_y ES:	,158	m

RESUMEN DE RESULTADOS:

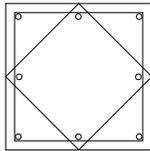
PR0 (Ton)	PRx (Ton)	MRx (Ton*m)	PRy (Ton)	MRy (Ton*m)
601,531	303,531	47,927	115,878	60,852

$$PR = 1 / (1/PRx + 1/PRy - 1/PR0) = 97,448 \text{ Ton}$$

$$PR/PR0 = ,162$$

$$M_{ux}/M_{rx} + M_{uy}/M_{ry} = 1,001$$

Por lo tanto, la sección es adecuada.



8#8
2E#3@20
p=1,6%

COLUMNA C-2

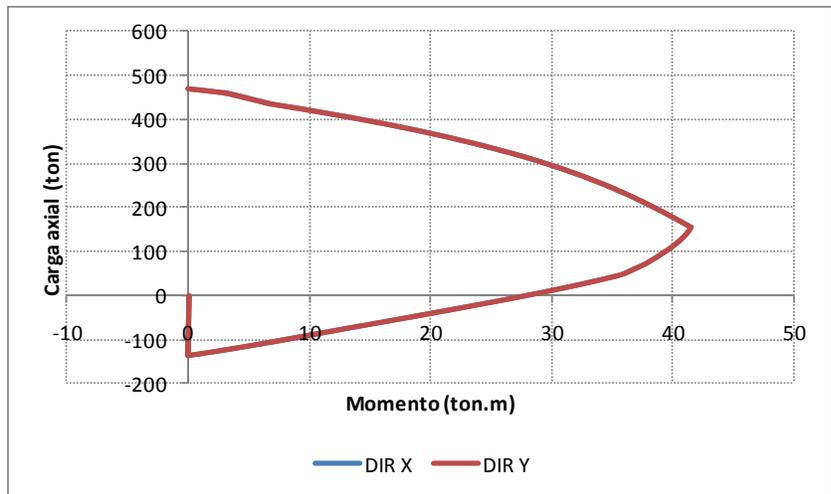


DIAGRAMA DE INTERACCIÓN

RESUMEN DE DATOS:

LA BASE ES:	50,000	cm
LA ALTURA ES:	50,000	cm
EL RECUB. ES:	5,000	cm
EL f _c ES:	250,000	Kg/cm ²
EL f _y ES:	4200,000	Kg/cm ²
EL Pu ES:	23,100	Ton
EL Mux ES:	11,600	Ton*m
EL Muy ES:	1,100	Ton*m
LA ex ES:	,048	m
LA ey ES:	,502	m

RESUMEN DE RESULTADOS:

PR0 (Ton)	PRx (Ton)	MRx (Ton*m)	PRy (Ton)	MRy (Ton*m)
470,669	75,028	37,873	380,462	18,082

$$PR = 1 / (1/Prx + 1/Prx - 1/Pr0) = 72,296 \text{ Ton}$$

$$PR/PR0 = ,154$$

$$Mux/Mrx + Muy/Mry = ,367$$

Por lo tanto, la sección es adecuada.

Trabes (CL)

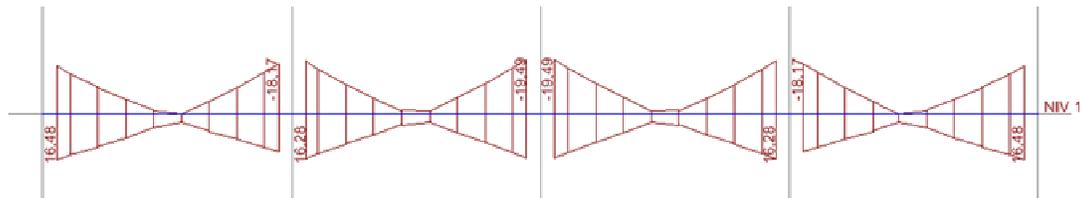


DIAGRAMA DE MOMENTO TRABE EJES LETRAS

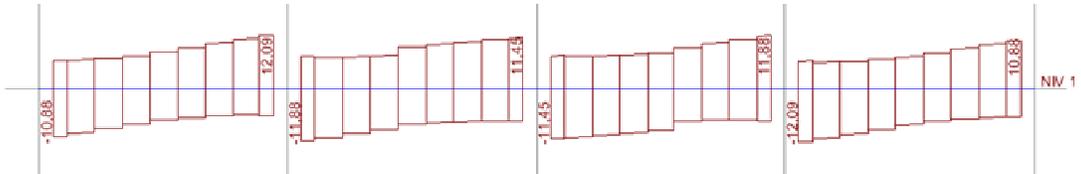


DIAGRAMA DE CORTANTE CONTRATRABE EJES LETRAS

VIGA	NIVEL	1		T-1	
	EJE	LETRAS			
ACERO LONGITUDINAL					
EXTREMO				b=	20 cm
				h=	60 cm
$M_{servicio} =$	13,33	t.m		r=	3 cm
$M_u =$	20,00	t.m		d=	57 cm
Cálculo de constantes					
$f'c =$	250	kg/cm ²		F.R.=	0,9
$f^*c =$	200	kg/cm ²		F.C.=	1,5
$f''c =$	170	kg/cm ²			
$f_y =$	4200	kg/cm ²		pb=	0,0190
$p_{min} =$	0,0026			$p_{max} =$	0,0190
$A_{s_{min}} =$	3,00	cm ²		$A_{s_{max}} =$	21,71 cm ²
$q_{min} =$	0,0651			$q_{max} =$	0,4706
$M_{Rmin} =$	6,26	t.m		$M_{Rmax} =$	35,78 t.m
Revisión de viga simplemente armada					
1) $M_u > M_{rmin}$		PASA			
2) $M_u < M_{rmax}$		PASA			
Cálculo del área de acero necesaria					
$A_{s_{necesario}} =$	10,47	cm ²			
Cálculo de acero propuesto La propuesta es adecuada					
3	#	6		$M_R =$	23,30 t.m
2	#	5			
$A_s =$	12,51	cm ²			

VIGA	NIVEL	1			
	EJE	LETRAS			
ACERO TRANSVERSAL					
$V_{\text{servicio}} =$	8,67	t		$L =$	700 cm
$V_u =$	13,00	t		F.R. =	0,8
				F.C. =	1,5
Requisitos generales					
a) $h \leq 70$ cm			CUMPLE		
b) $h/b \leq 6$			CUMPLE		
c) $L/h \geq 5$			CUMPLE		
Cálculo del cortante resistente					
$P_{\text{tensión}} =$	0,0092			Estribos #	3
$V_{CR} =$	6133	kg		$a_s =$	0,71 cm ²
$V_{SR} =$	10918	kg		$A_v =$	1,43 cm ²
				$s =$	28,50 cm
	$V_R = 17,05$	t			
1) $V_u < 1.5 F.R \text{ bd } (f^*c)^{0.5} =$		19346	kg		CUMPLE
2) $V_u < 2.5 F.R \text{ bd } (f^*c)^{0.5} =$		32244	kg		CUMPLE
La propuesta es correcta					
	Estribos #	3	@	25,0	cm

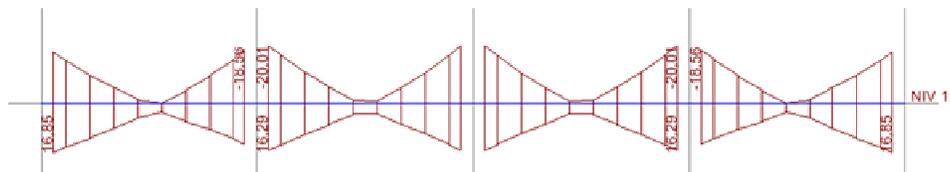


DIAGRAMA DE MOMENTO TRABE EJES NÚMEROS

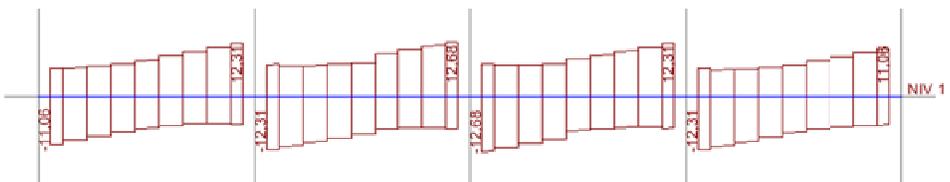


DIAGRAMA DE CORTANTE TRABE EJES NÚMEROS

D. CUANTIFICACIÓN DE EDIFICIOS

Se presenta en este apartado la cuantificación del edificio estudiado en sus dos casos, para concreto normal y concreto ligero.

La cuantificación que se presenta es solamente de los materiales acero y concreto.

Enseguida de los títulos se agrega entre paréntesis al caso de cuantificación que se trata, CN para concreto normal y CL para concreto ligero.

PROYECTO:	TESIS CONCRETO LIGERO						NÚMEROS GENERADORES	
FECHA:	2009-09-17							
TIPO DE ELEMENTO CONSTRUCTIVO A EJECUTAR						CONCEPTO DEL CATALOGO		
LOSA DE CIMENTACIÓN						SUMINISTRO Y HABILITACIÓN DE ACERO DE REFUERZO		
PLANTA	DIAMETRO	ML	N° PZAS	ML TOTALES	KG/ML	kg	CROQUIS	
CIMENTACIÓN	N° 4	22	90	1980	0,994	1968,12		
	N° 4	18	110	1980	0,994	1968,12		
BASTONES	N° 4	2,3	440	1012	0,994	1005,928		
	N° 4	2,8	360	1008	0,994	1001,952		
			KG POR EJE	N° DE EJES				
			5944,12	1				
						UNIDAD	CANTIDAD	
						KG	5944,12	
				REVISÓ		AUTORIZÓ		
HOJA GENERADORA N°		3		FECHA		SEPTIEMBRE, 2009		

PROYECTO:	TESIS CONCRETO LIGERO						NÚMEROS GENERADORES	
FECHA:	2009-09-17							
TIPO DE ELEMENTO CONSTRUCTIVO A EJECUTAR						CONCEPTO DEL CATALOGO		
COLUMNA C1						SUMINISTRO Y HABILITACIÓN DE ACERO DE REFUERZO		
PLANTA	DIAMETRO	ML	N° PZAS	ML TOTALES	KG/ML	kg	CROQUIS	
NIVEL 1-2	N° 8	7	16	112	3,973	444,976		
	N° 3	2	35	70	0,56	39,2		
	N° 3	1,6	35	56	0,56	31,36		
			KG POR EJE	N° DE COLUMNAS				
			515,536	21				
						UNIDAD	CANTIDAD	
						KG	10826,256	
				REVISÓ		AUTORIZÓ		
HOJA GENERADORA N°		4		FECHA		SEPTIEMBRE, 2009		

BIBLIOGRAFÍA COMPLETA

- **American Concrete Institute (2003)**. "ACI 213R-03. Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete".
- **Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese, Jussara Tamesi (2004)**. "Diseño y Control de Mezclas de Concreto" EB201 Portland Cement Association.
- **Manuel Mena Ferrer (1967)**. "Estudio de Concretos Ligeros" Instituto de Ingeniería.
- **Gyula Rudnai (1963)**. "Lightweight Concretes". Publishing House of the Hungarian Academy of Sciences, Budapest.
- **Short & W. Kinniburgh (1963)**. "Lightweight Concrete". John Wiley and Sons, Inc., Nueva York.
- **A. M. Neville (1975)**. "Properties of Concrete" Pitman Publishing
- **American Concrete Institute (1998)**. "ACI 211.2-98 Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete".
- <http://www.imcyc.com.mx/cyt/febrero03/autocompactable.htm>

- **American Society of Test Material (2002).** “ASTM C 469-02. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression”.
- **American Society of Test Material (1996).** “ASTM C 496-96. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens”.
- **American Society of Test Material (2001).** “ASTM C 39/C 39M-01. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens”.
- **Industria de la Construcción (2004).** “NMX-C-073-ONNCCE-2004 Industria de la Construcción – Agregados – Masa Volumétrica – Método de Prueba”.
- **Industria de la Construcción (2002).** “NMX-C-083-ONNCCE-2002 Industria de la Construcción – Concreto – Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cilindros de Concreto – Método de Prueba”.
- **Industria de la Construcción (2004).** “NMX-C-109-ONNCCE-2004 Industria de la Construcción – Concreto-Cabeceo de Especímenes Cilíndricos”.
- **Industria de la Construcción (1997).** “NMX-C-128-ONNCCE-1997 Industria de la Construcción – Concreto Sometido a Compresión – Determinación del Módulo de Elasticidad Estático y Relación de Poisson”.
- **Industria de la Construcción (1997).** “NMX-C-163-ONNCCE-1997 Industria de la Construcción – Concreto – Determinación de la Resistencia a la Tensión por Compresión Diametral en Cilindros de Concreto”.
- **Industria de la Construcción (2002).** “NMX-C-148-ONNCCE-2002 Industria de la Construcción – Cementos Hidráulicos – Gabinetes y Cuartos Húmedos y Tanques de Almacenamiento para Curado de Especímenes de Mortero y Concreto de Cementantes Hidráulicos”.
- **Industria de la Construcción (2004).** “NMX-C-155-ONNCCE-2004 Industria de la Construcción – Concreto – Concreto Hidráulico Industrializado - Especificaciones”.
- **Industria de la Construcción (1997).** “NMX-C-156-ONNCCE-1997 Industria de la Construcción – Concreto – Determinación del Revenimiento en el Concreto Fresco”.
- **Industria de la Construcción (2004).** “NMX-C-159-ONNCCE-2004 Industria de la Construcción – Concreto – Elaboración y Curado de Especímenes en el Laboratorio”.
- **Industria de la Construcción (1997).** “NMX-C-161-ONNCCE-1997 Industria de la Construcción – Concreto Fresco – Muestreo”.
- **Industria de la Construcción (2002).** “NMX-C-164-ONNCCE-2002 Industria de la Construcción – Agregados – Determinación de la Masa Específica y Absorción de Agua del Agregado Grueso”.
- **Industria de la Construcción (2004).** “NMX-C-165-ONNCCE-2004 Industria de la Construcción – Agregados – Determinación de la Masa Específica y Absorción de Agua del Agregado Fino”.
- **Industria de la Construcción (1999).** “NMX-C-403-ONNCCE-1999 Industria de la Construcción – Concreto Hidráulico para Uso Estructural”.
- **Gobierno del Distrito Federal, (2004)** “Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal,” Gaceta Oficial del Gobierno del Distrito Federal, México, D.F.

- **Gobierno del Distrito Federal, (2004)** “Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto,” Gaceta Oficial del Gobierno del Distrito Federal, México, D.F.
- **Gobierno del Distrito Federal, (2004)** “Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismo,” Gaceta Oficial del Gobierno del Distrito Federal, México, D.F.
- **Comisión Federal de Electricidad, (1993)** “Manual de Diseño de Obras Civiles Diseño por Sismo”. México.
- **Meli Piralla R., (2001)** “Diseño estructural,” Editorial Limusa, primera reimpresión de la segunda edición, México.
- **González Cuevas y Robles Fernández, (2005)** “Aspectos Fundamentales del Concreto Reforzado”. Editorial Limusa, México.
- **Santiago Loera y Carlos Javier Mendoza, (1991)** “Comentarios, Ayudas de Diseño y Ejemplos de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto, DDF” Instituto de Ingeniería UNAM, México.
- **EDIFUR, (1992)** “Matrices Desglosadas 1992 Costos y Presupuestos Edificación y Urbanización” Tomo 3, Peimbert, México.
- **American Concrete Institute ACI-318-05, (2005).** “Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary” ACI Committee 318
- **Reglamento de Construcción de Nueva Zelanda NZS 3101:PARTE 1, (1995)**